

第 9 回

千葉県非破壊検査研究会
研究発表会

日時 平成 7 年 1 月 31 日 (火)

13:30~17:00

会場 高度ポリテクセンター

目次

1. 多周波数斜角探触子の紹介 ----- 1
ジャパンプローブ㈱ ○幸崎 進, 星野充宏
NKK京浜製鉄所 村山 章
㈱トキメック 鬼丸昭夫
2. ハンディ超音波透視装置の開発 ----- 9
日本クラウトクレマー㈱ ○村井純一, 白岩俊男, 末吉光男,
桐生啓二, 平賀久喜
3. 超音波映像装置によるすき間検出性の検討 ----- 15
日立建機㈱ ○小倉幸夫, 佐藤温子, 石川 潔
4. 放射線透過写真の 12bit画像処理 ----- 22
日本非破壊検査㈱ ○木下義高, 俣賀文雄
5. 角形鋼管柱角部の超音波探傷試験方法について ----- 29
(1)角形鋼管柱溶接角部の超音波探傷試験方法に関する実験
(2)角形鋼管柱溶接角部の超音波探傷試験方法 指針 (案)
清水建設㈱技術研究所 ○倉持 貢 (NDI 212小委員会委員長)
6. 裏当て金付完全溶込みT継手のルート部からのエコー判別法に関する
指針改正作業について ----- 41
千葉県機械金属試験場 ○立川克美 (NDI 212小委員会WGL)
7. 球状黒鉛鑄鉄品の球状化率と超音波の音速に関する実験的検討 ----- 49
日本鑄鉄管㈱エンジニアリング部 ○高橋雅和

多周波数斜角探触子の紹介

Introduction of Multi-Frequency Angle Beam Probe

N K K 京 浜 製 鉄 所 村 山 章
ジャパンプローブ (株) ○幸崎 進 屋野 充宏
(株) トキメック 鬼丸 昭夫

概 要

1ケの探触子で2つ以上の周波数(例: 5 MHz と 2.5 MHz)を何時でも必要に応じて即時に切換えて送受信できる斜角探触子を開発した。この探触子は、入射点・屈折角・ビーム路程等が周波数を切換えても殆ど変わらない特徴があり、市販されている超音波探傷器にそのまま使用できるため、鋼溶接部などの探傷に於いて、その場で、2つの周波数で“きず”の確認などに有効に活用できるのではないかとと思われる。

1. まえがき

鋼溶接部の超音波探傷において、その多くは5 MHzの斜角探触子で行われているのが現状である。^{1), 2)}しかし、この5 MHzの斜角探触子は超音波の指向性が鋭い為、傷の形状と方向によっては傷を見落とす可能性があると言われている。これに対して、2 MHzの周波数の場合音波の指向性は鈍くなり傾いた割れのような面状欠陥に対しても検出力は、低下しない傾向を有している。^{3), 4), 5), 6), 7)}

そこで1ケの探触子に付けられたスイッチを切換えるだけで、複数の周波数を送受信できると共に、周波数を切換えても、入射点・屈折角・ビーム路程が変わらず、感度差も少ない探触子を開発したので諸性能を紹介する。

2. 多周波数斜角探触子の構成

- 2.1 振動子の構成: 図1は振動子の構成を示すように複数の振動子を積層に接着した。
- 2.2 振動子の発振: 振動子をくさびに接着し、高い周波数は(A)B又は(B)Cで発振させ、低い周波数は(A)Cで発振させる。この場合周波数の切り換えは探触子についているスイッチで行なう。図2は多周波数斜角探触子の断面図を示す。

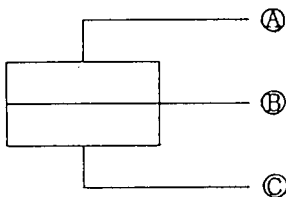


図1 振動子の構成

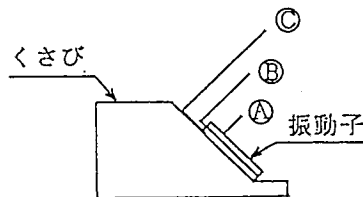


図2 多周波数斜角探触子の断面図

3. 実験内容

3.1 使用機材

表1 使用機材

探 傷 器	FD-610S	三菱電機㈱
オシロスコープ	SS-7611	岩崎通信機㈱
スペクトラムアナライザー	R4131RN	㈱アドバンテスト

3.2 試験片：JIS Z 2345 STB-A1 No5083

JIS Z 2345 STB-A2 No3992

3.3 接触媒質：スピンドル油

3.4 多周波数斜角探触子：屈折角はA45, A60, A70の3種類とし、その探触子の外観は図3に示す。

2.5/5C10×10A45

2.5/5C10×10A60

2.5/5C10×10A70

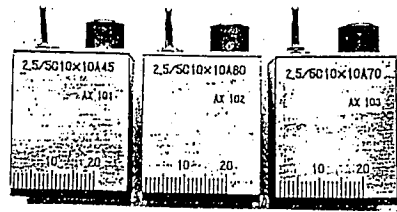


図3 多周波数斜角探触子外観

3.5 実験方法

多周波数探触子の一探触子の諸性能は次の1)~7)項目について測定した。1)~5)項目は超音波探触子の性能測定方法 (JIS Z 2350-1992)に基づいて行った。⁸⁾

- 1) ビーム中心軸の偏りと偏り角
- 2) 入射点
- 3) 屈折角
- 4) 不感帯
- 5) 試験周波数
- 6) ビームの拡がり
- 7) 面状傷に対するエコー高さの変化

6)のビームの拡がりは、マグネット付きガイドを用いて探触子の前後走査及び左右走査をした。反射源はSTB-A2 φ4×4で探触子距離は0.5~2.0スキップを1mmピッチで走査した時のφ4×4でエコー高さを測定した。エコー高さはCRT上50%にしてゲイン目盛を読み取った。

7)の面状傷に対するエコー高さの変化は、マグネット付ガイドを用いて、STB-A2の厚さ15mmの端面を0.5~1.0スキップで傾き角を0.5°ピッチで変化させた時の端面エコーを測定した。エコー高さはCRT上50%にしてゲイン目盛を読み取った。

表2 ビームの拡がりと面状傷に対するエコー高さの変化の測定条件

	反 射 源	探 触 子 距 離
前後走査	STB-A2 φ4×4	0.5~2.0 スキップ (A45)
左右走査	STB-A2 φ4×4	0.5~1.5 スキップ (A60, A70)
面 状 傷	STB-A2 厚さ15mmの端面	0.5~1.5 スキップ (A45)
		0.5~1.0 スキップ (A60, A70)

4. 実験結果

4.1 多周波数斜角探触子の一探触子の性能

今回の多周波数斜角探触子の一探触子の性能(JIS Z 2350 の規定)は表3に示す。

図4は多周波数斜角探触子の一探触子周波数測定結果を示す。

表3 多周波数斜角探触子の一探触子の性能

公称屈折角	公称周波数 (MHz)	ビーム中心軸 偏りと傾り角 (°)	入射点 (mm)	STB屈折角 (°)	不感帯 (mm)	試験周波数 (MHz)	A1感度 (dB)	A2感度 (dB)
A 45	2.5	0	9.0	44.2	6.0	2.3	77.0	60.0
	5	0	9.0	44.6	0.5	5.2	73.5	55.5
A 60	2.5	0	10.5	58.9	4.0	2.2	76.5	48.0
	5	0	10.0	59.3	3.0	5.2	73.0	37.0
A 70	2.5	0	12.0	69.0	6.0	2.2	74.0	40.5
	5	0	11.5	70.1	0.5	5.4	72.0	39.0

表3の測定データよりスイッチによって周波数を切り換えても

- 1) 入射点は屈折角45°~70°で0~0.5mmのズレである。
- 2) 屈折角は45°、60°で0.5°以内、70°は1.1°の差である。
- 3) ビーム路程の変化(時間軸の立上がり)のズレはない。

図5は周波数のスイッチ切り換えによるR100面のビーム路程を示す。

- 4) A1感度は従来のものと同等である(当社製品比)。

4.2 ビームの拡がり

- 1) 前後方向のビームの拡がり及び左右方向のビームの拡がりの測定結果を、表4と図6、図7に示す。

表4 前後方向のビームの拡がり及び左右方向のビームの拡がり(10x17)

公称 屈折角 (°)	前後方向			左右方向		
	5MHz (mm)	2.5MHz (mm)	2.5/5 比	5MHz (mm)	2.5MHz (mm)	2.5/5 比
A 45	7.0	8.5	1.2	3.0	6.0	2.0
A 60	12.0	9.0	0.8	4.0	6.5	1.6
A 70	23.5	39.0	1.7	5.5	9.5	1.7

- 2) 5MHzに比較して、前後方向も左右方向の何れも、2.5MHzの方が、ビームが拡がっていることが測定された。ビームの拡がり方は左右方向が顕著である。
- 3) 然し、屈折角60°の場合、前後方向のビームは寧ろ狭くなっており、この原因は未だ明らかでない。

4.3 面状傷に対するエコー高さの変化

図8はビームの入射方向が変化した時の面状傷に対するエコー高さの変化を示す。

横軸の0はビームが垂直に入射した時のエコー高さでこれを基準とした。エコー高さが6dB低下するビームの傾き角は、各角度で多少異なるがおよそ5MHzで、2.0°~2.5°、2.5MHzは3.5°~5°である。これは面状傷に対して、2.5MHzの方が、ビームが傾いて入射した時エコー高さの低下が少なく、5MHzに対して見落としが少くないことを意味している。これは高橋³⁾立川^{4) 5)}横野^{6) 7)}等が傷の指向

性に対して2MHzの方が有利であると指摘している根拠である。

5. 考察

- 1) 4.1 項の測定結果から判断できるとおり、周波数を切替えても、入射点・屈折角・ビーム路程は殆ど同じである。70°の場合屈折角が約1°ズレているが、この場合でも、ズレが小さい為実探傷上では問題にならないと考えている。
- 2) 位置の確認が必要な時や異なる2つの周波数で評価する場合でも、事前に感度差や屈折角を測定しておけば、実用上の問題は生じないと考えている。
- 3) この探触子の使い方としては、探傷時に明らかにノイズとは異なるエコーが発生し、評価レベル以下のエコー高さであっても、傾いた面状“きず”からのエコーと疑わしい場合、その場で直ちに周波数を切替えて、容易に確認できる手段として用いることが可能と考えている。

6. 結論（まとめ）

今回多周波数探触子2.5/5C10×10A45、2.5/5C10×10A60
2.5/5C10×10A70を製作し、その結果次の結論が得られた。

- 1) 所期の目的の通り5MHzで鋭いビーム特性を、2.5MHzで広いビーム特性と2つの特性を兼ね備えた1ケの探触子を開発することができた。
- 2) この2つの探触子は基本特性である入射点、屈折角、ビーム路程がほぼ同じであり検出感度が殆んど同じレベルのため、目的に応じて周波数を切替えられるなど幅広い活用が可能になった。

参考文献

- 1) 鋼溶接部の超音波探傷試験法 JIS Z 3060-1994
- 2) 鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準同解説、日本建築学会
- 3) 高橋雅和：バットレス傷の角度と超音波斜角探傷におけるエコー高さの実験的検討、NDI誌第38巻第1号、(1989)
- 4) 立川克美：2MHz広帯域斜角探触子による溶接部の探傷、NDI資料 No. 21396、(1992)
- 5) 立川克美：2MHz斜角探触子による溶接部の探傷、第7回千葉県非破壊検査研究会、P37～45、(1993)
- 6) 横野泰和：2MHz広帯域斜角探触子の特性と溶接部への適用、NDI資料No. 21397、(1992)
- 7) 横野泰和：超音波探傷試験において直線溝の傾きがエコー高さに及ぼす影響、平成4年春季大会講演概要P3～4、(1992)
- 8) 超音波探触子の性能の測定方法 JIS Z 2350-1992

- ・探触子 2.5/5C10x10A70
- ・反射源 STB-A1 R100面

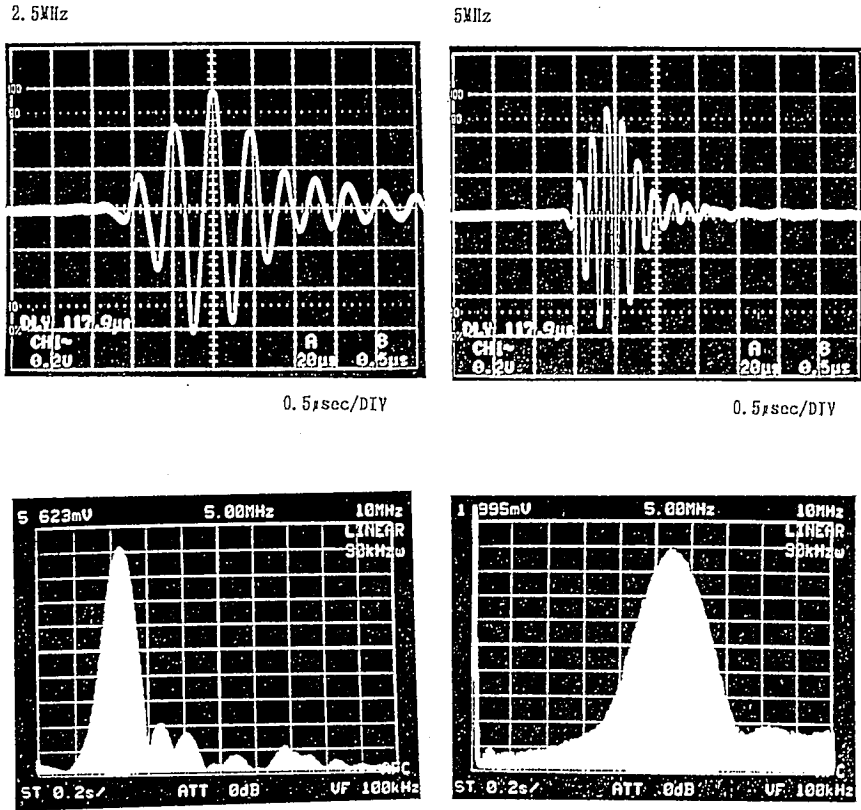


図4 多周波数斜角探触子の一探触子の周波数測定結果

- ・探触子 2.5/5C10x10A70
- ・反射源 STB-A1 R100面
- ・測定範囲 125mm

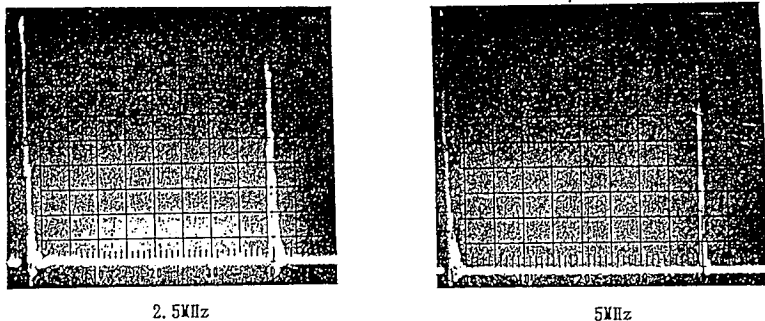
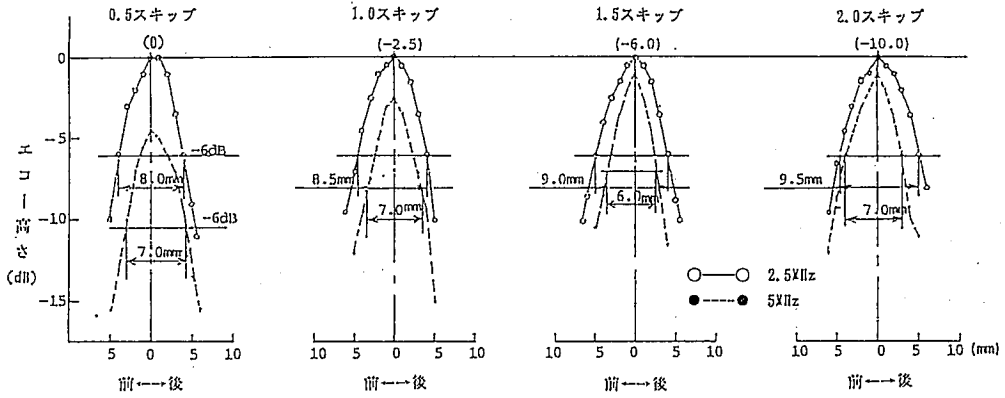


図5 周波数切り換えによるR100面のビーム路程

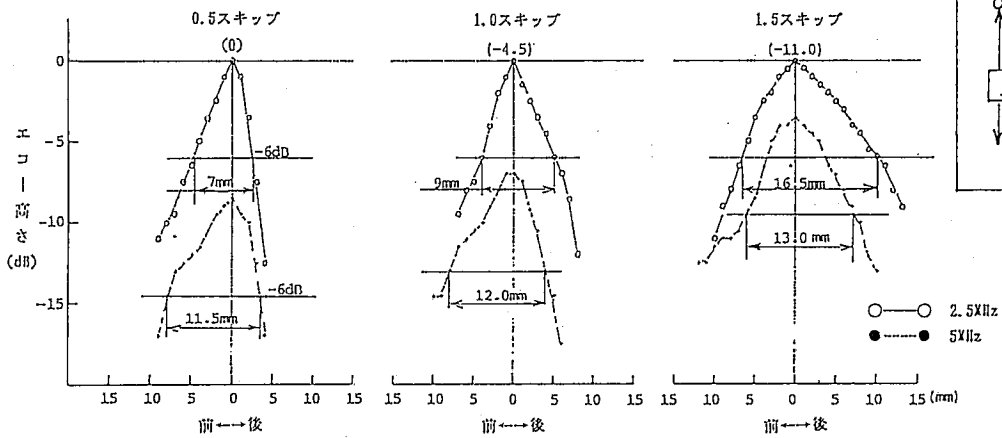
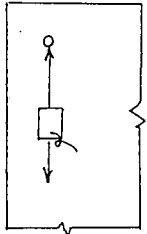
2.5/5C10×10A45

() 内の数値は0.5スキップに対する感度差 (dB) を示す。



2.5/5C10×10A60

STB-A2 #4×4



2.5/5C10×10A70

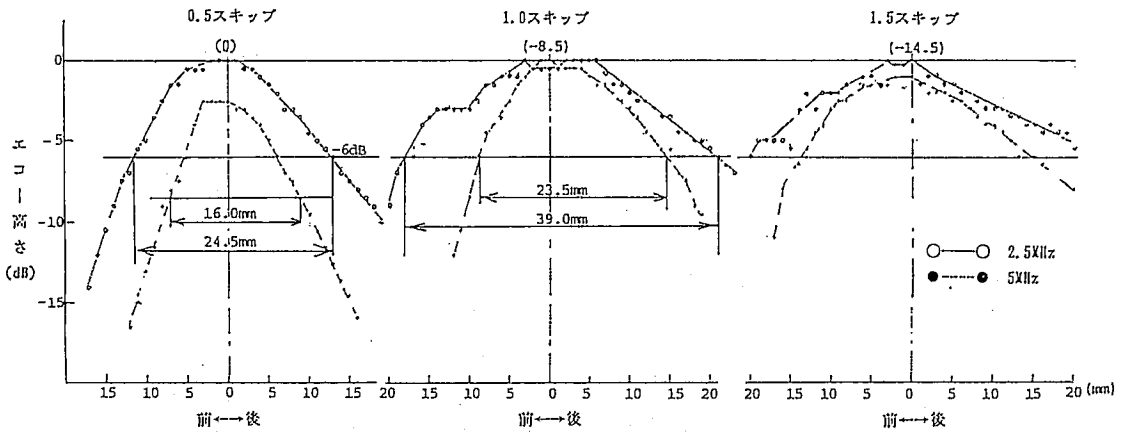


図6 前後方向のビームの拡がり

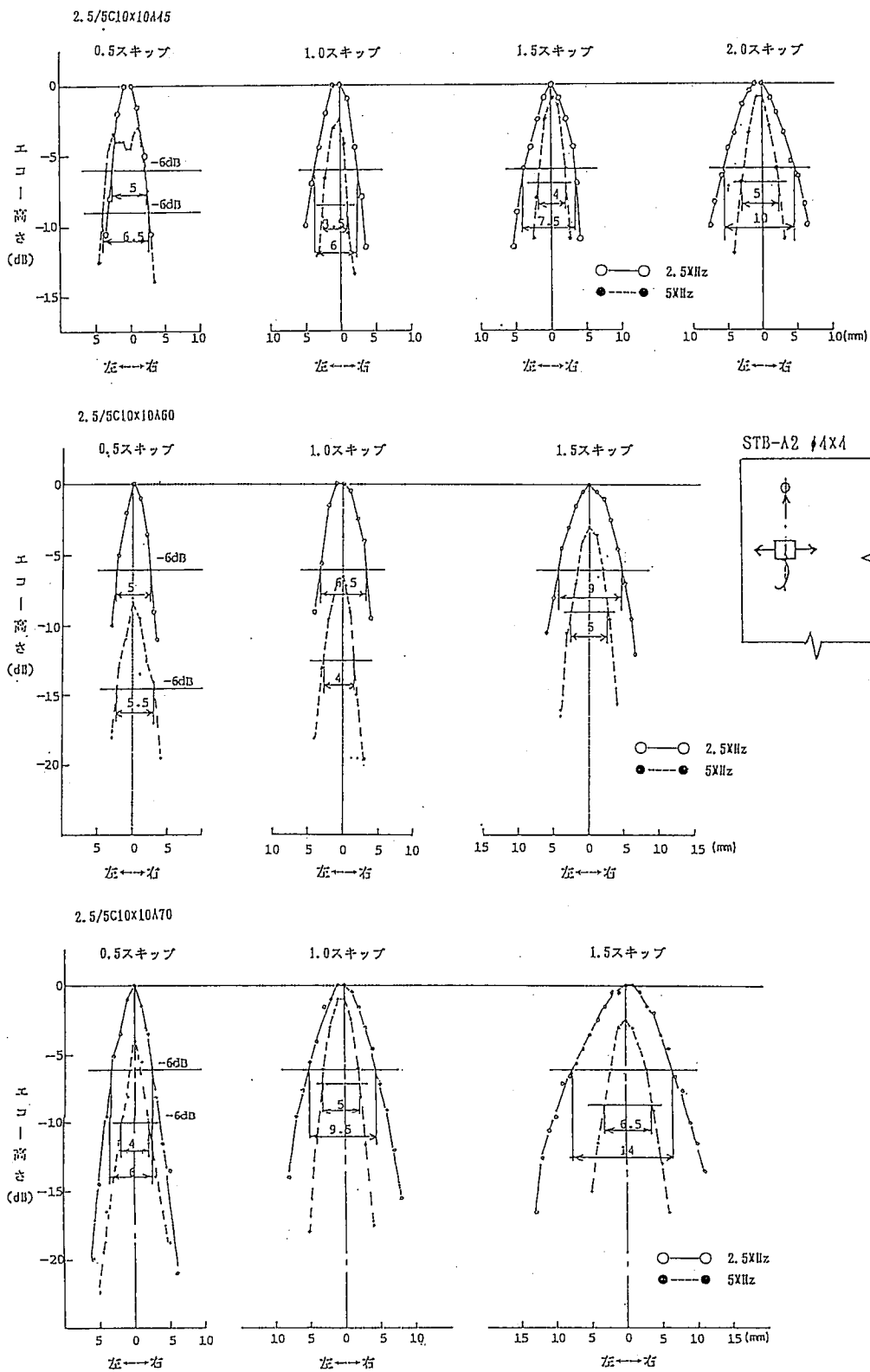


図7 左右方向のビームの拡がり

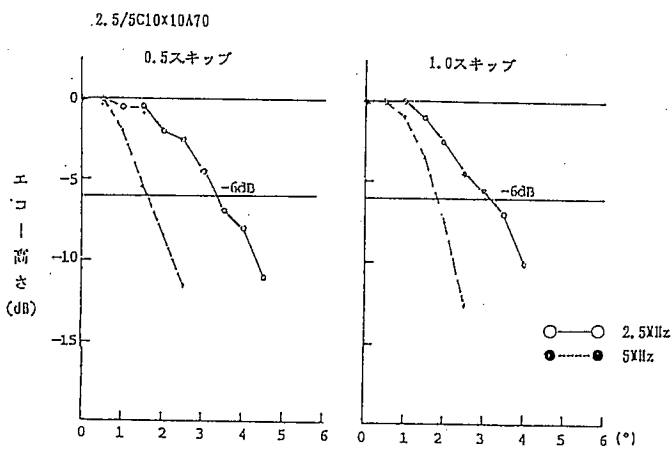
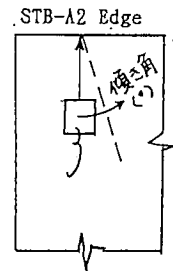
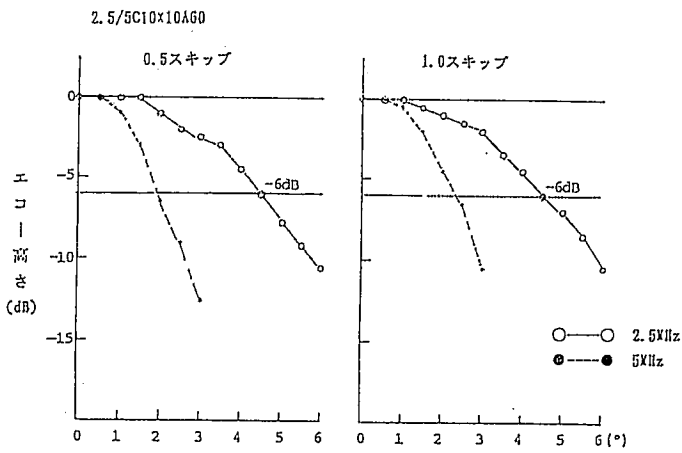
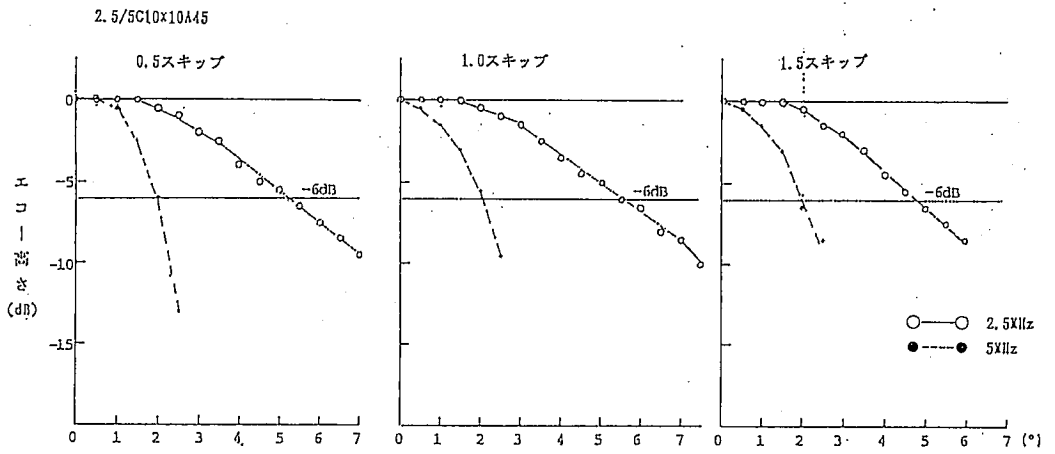


図8 面状傷に対するエコー高さの変化

ハンディー超音波透視装置の開発

Development of Portable Ultrasonic Imaging Scanner System

日本クラウトクレーマー株式会社

村井 純一、白岩 俊男、末吉 光男

桐生 啓二、平賀 久喜

概要

材料内部の傷探傷、及び腐食測定を現場で画像処理し、平面表示、断面表示するハンディ超音波画像処理装置を開発した。この装置はアーム型スキャナ、超音波探傷器、及びノート型コンピュータから成り、1 mmの精度で探触子位置データを取り込み、リアルタイムでコンピュータ表示画面に基本表示を表示し、ゲート内の最大3個のエコーの平面表示及びビーム路程断面表示を行い、任意の位置のAスコープ波形を記録する。探触子は垂直、斜角及び垂直斜角複合探触子が使用でき、画像を集積表示可能である。

1. 始めに

屋外貯蔵タンク底板の厚さ測定、化学プラントの塔槽配管や原子力プラント機器の探傷等で、腐食減肉と非金属介在物の判別や水素誘起割れの進展状況を知るためには、ゲート内の1個のエコー高さ及びビーム路程のみのデータだけでは不十分である。腐食減肉と非金属介在物との区別は、きずエコーと底面エコーの2つのエコーを評価する必要があり、水素誘起割れの探傷は、きずの方向性から、垂直探傷と斜角探傷の2つの画像が必要である。ゲート内の2～3個のエコー又は異なる探傷法の画像を集積する等、多くのデータを総合的に検討すると、きずの形状や分布状態から有害なものか、そうでないものかの判定が行え、従来の少ないデータから判定するのに比べて短時間で、説得力のあるレポートを作成することが出来る。超音波探傷器USD10を用いたハンドスキャナーについては既に発表した¹⁾が、今回、超音波探傷器USD15とアーム式ハンディスキャナーを用いて介在物処理、Aスコープ収録機能及び垂直・斜角画像集積機能を追加したハンディ超音波画像処理装置を開発したので、紹介する。図1に全体構成写真を示す。

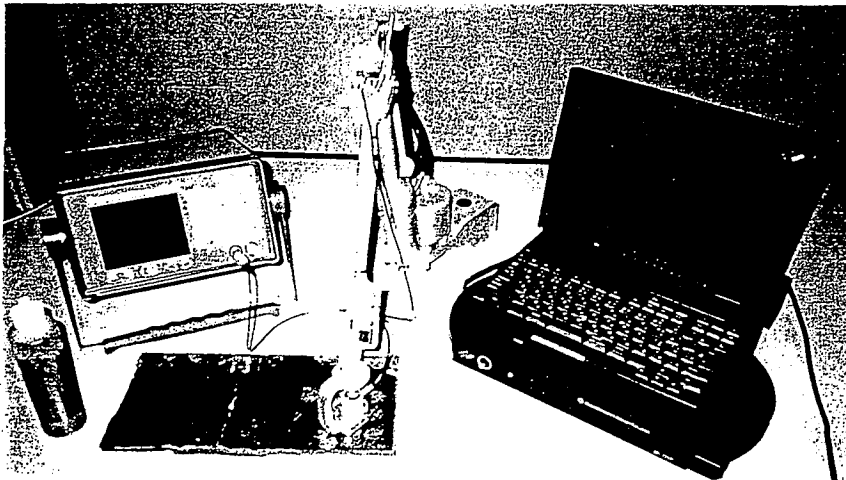


図1 ハンディ超音波画像処理装置

2. 装置仕様

2. 1 超音波探傷器USD15

探傷周波数範囲	: 0.3~20MHz(-3dB)
感度調整範囲	: 0~111.0dB
測定範囲	: 2.5mm~9999mm (鋼中縦波)
インターフェイス	: RS232C,RS422,RF出力、NTSCビデオ出力、KKインターフェイス
動作時間	: 最大5時間 (NiCd電池フル充電)

2. 2 ハンデイスキャナ部

走査範囲	: 半径600mmの半円、最大400X400mm、最小50X50mm
固定方式	: マグネット、吸盤 (オプション)
手元スイッチ	: アーム先端のプロブホルダー部にあり、スキャン範囲、測定開始・終了、最大エコー法・最新エコー法モード切り替え、表示ピッチ切り替えを指示
分解能	: 1mm

2. 3 映像処理部

コンピュータ	: IBM ThinkPad755C RAM:20~36MB HDD:530MB
CPU	: i486DX4
サンプリングレート	: 20nS(50MHz)
A/D変換メモリ	: 4KB
リアルタイム表示	: 基本表示、平面表示、および断面表示
データ取り込み	: 最新値またはエコー高さ最大値
表示種類	: エコー高さ、ビーム路程、基本表示、平面表示、断面表示、部分透視、全透視、3D表示、3D+B+ST表示
表示カラー	: 256色
表示機能	: 拡大、縮小、平面表示上寸法測定、断面表示上深さ測定、カーソル位置のXY座標、エコー高さ、ビーム路程、カーソル位置及び表示範囲を下隅に表示
ティーチング機能	: 手元スイッチによる2点ティーチングにより試験体とスキャナの平行度を設定
テンプレート機能	: 手元スイッチによりスキャン範囲を設定
ピッチ切り替え機能	: 手元スイッチによりデータ取り込みピッチを切り替え
電源	: AC又は外付バッテリー (動作時間2H)

3. 画像処理機能

3. 1 信号処理

超音波探傷器USD15からRF波形を直接取り込み、ソフト上で検波して、ビデオ信号に変換してAスコープ上で次の様な処理を行っている。

3. 2 探傷時の基本表示、平面表示、断面表示の同時表示

探傷中は、基本表示、平面表示、断面表示を同時に画面表示し、データ取り込みは、

エコー高さ最大値又は最新値のいずれかのモードをデータ収録中に選択出来る。

3. 3 基本表示

Aスコープを20nS(50MHz)でサンプリングし、バーゲートと共に基本表示し、三角形のカーソルにより取り込んだエコーの確認をすることが出来る。ビーム路程の計測は、最大エコー位置（ピークモード）又はゲートを横切る位置（フランクモード）の何れかが選択出来る。

3. 4 介在物の分離

任意のゲート内Aスコープ波形で、最大3種類までのエコーを分離し、それぞれのエコーで、エコー高さとビーム路程を計測し、リアルタイムに平面表示、断面表示上に描画する。

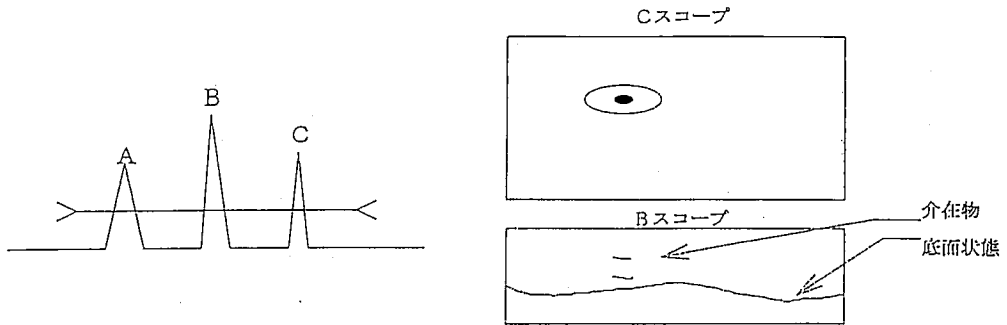


図2 ゲート内3エコーの断面表示

3. 5 Aスコープ波形のポイント登録

測定終了後、参考のためにAスコープ波形を記録したい場合、任意の位置に探触子を移動させると、平面表示上でカーソルが表示されるので、その位置で押ボタンを押すことによりそのポイントのAスコープ波形のハードディスクへの登録が最大20ポイントまで可能である。これにより、例えば底面腐食なのか非金属介在物なのかの判定に必要な基本表示画面を簡単に取り込むことが出来る。登録された波形は、解析時の平面表示上で、登録時のポイントがマーカー表示され、そのポイントの選択で基本表示波形を画面上に呼び出すことが出来る。

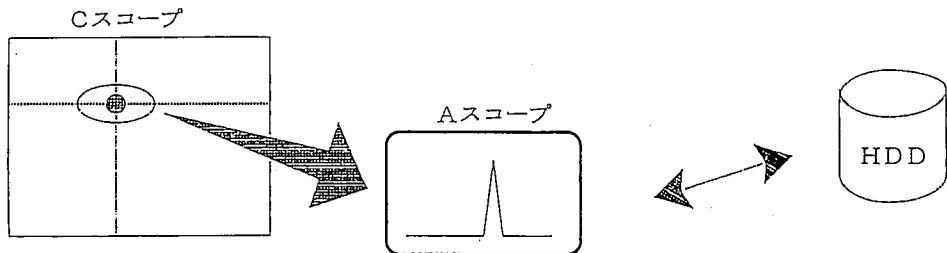


図3 Aスコープ波形のポイント登録

3. 6 重ね書き表示

垂直・斜角複合探触子を使用して、垂直探傷と斜角探傷を行った場合、その二枚の画像を重ね書きする機能がある。これにより例えば、鋼板内部に発生した水素誘起割れ (Hydrogen Induced Cracking) の板厚方向への進展の確認が可能である。

3. 7 透視表示

探傷後、全断面又はカーソル間の B 又は S T 部分透視表示を行う。

3. 8 拡大表示、原寸表示

カーソルで選択した範囲を拡大表示する。

3. 9 計測値表示機能

カーソル位置でのエコー高さ及びビーム路程を数値表示する。

3. 10 寸法測定機能

二本のカーソル間の欠陥指示長さ又は寸法測定を行う。

4. アプリケーション例

4. 1 アクリル対比試験片の測定例

アクリル樹脂で製作した対比試験片 (100X100X30t) の厚さ測定の例を、図 4 ビーム路程モードの平面及び断面表示、及び図 5 エコー高さモードの平面及び断面表示に示す。

4. 1. 1 使用探触子

G5 KB(f)(B5C10N)

4. 1. 2 探傷器調度

測定範囲 : 50.0mm

PROBEDEL : 0.12 μ s (ディレーラインの長さ)

音速 : 2,730m/s

POWER : 220pF

DAMPING : 50 Ω

ゲート開始点 : 2.0mm

ゲート巾 : 32.0mm

4. 2 非金属介在物試験体の探傷例

非金属介在物を含む屋外貯蔵タンク底板から切り出した試験体 (100X200X10t, SS41) の探傷例を、図 6 タンク底板の探傷時の平面・断面表示例、図 7 非金属介在物の平面・断面表示例に示す。

4. 2. 1 使用探触子

G5 KB(f)(B5C10N)

4. 2. 2 探傷器調度

測定範囲 : 25.0mm

PROBEDEL : 0.12 μ s (ディレーラインの長さ)

音速 : 5,920m/s

POWER : 220pF

ゲート開始点 : 3.0mm

ゲート巾 : 10.0mm

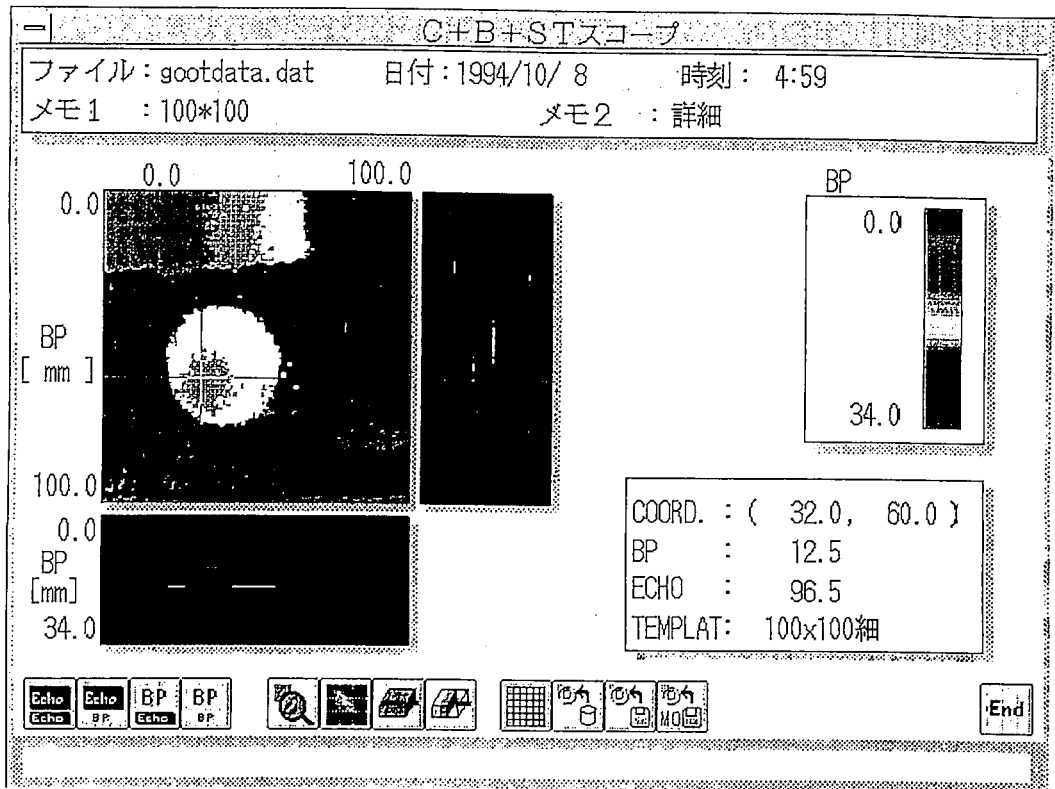


図4 ビーム路程モードの平面及び断面表示

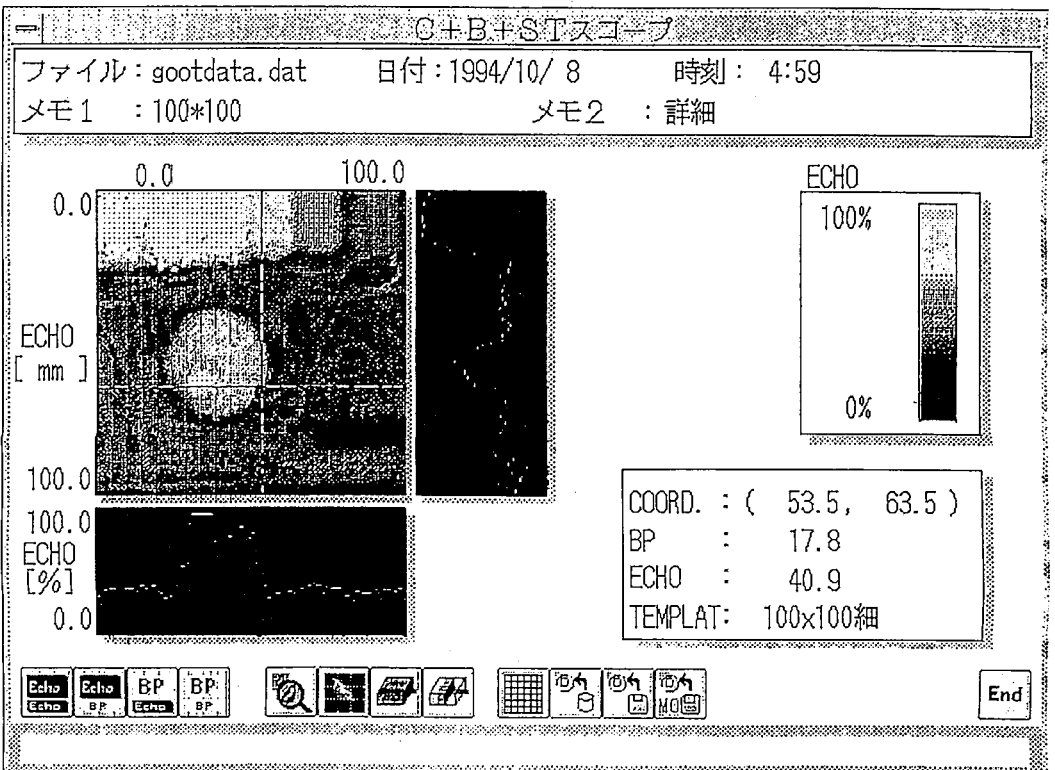


図5 エコー高さモードの平面及び断面表示

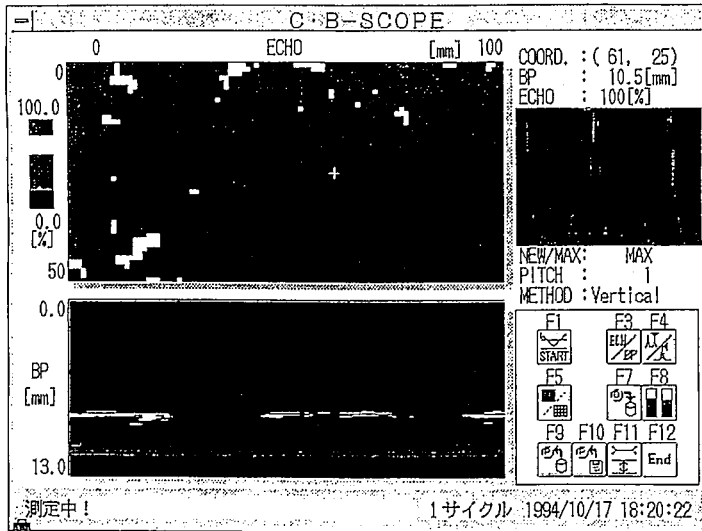


図6 タンク底板の探傷時の平面・断面表示例

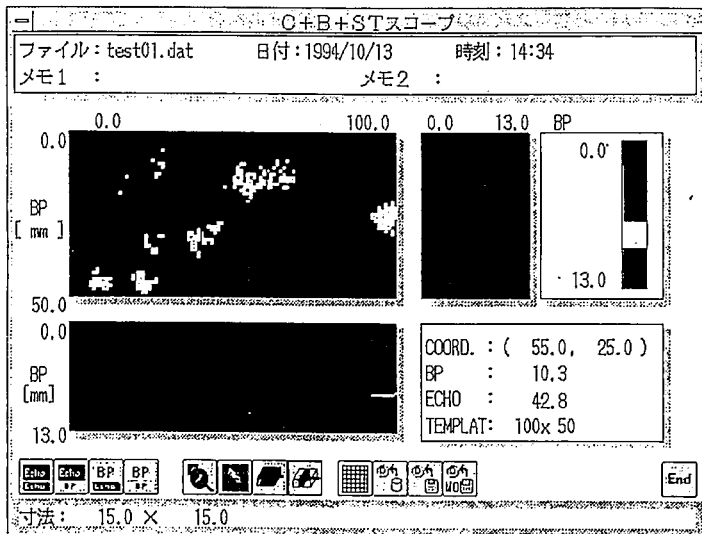


図7 非金属介在物の平面・断面表示例

5. まとめ

ハンディ超音波画像処理装置HDS2400Aは、探触子を手動でランダムにスキャンすることにより、X-Y座標、エコー高さ、ビーム路程を自動的に取り込み、リアルタイムに基本表示及び平面・断面表示することが出来る。必要に応じAスコープも任意の位置又は全位置において取り込めるので、例えば介在物か腐食かの判断に必要なデータ採取が可能となる。探触子は、垂直探触子、斜角探触子、さらに垂直・斜角複合探触子が使用出来るので、板厚に平行及び垂直な平面を持つ反射体、例えば、水素誘起割れ等の欠陥の画像表示が可能である。報告書は事務所でハードコピーにより簡単に作成出来るので、検査に必要な時間と経費を大幅に削減し、信頼性のある説得力のある報告書を作成することが出来る。

6. 参考文献

- 1) 白岩、村井、末吉、平賀、井田：HDS2000の概要、NDI資料21394

超音波映像装置によるすき間検出性の検討

日立建機(株) 小倉 幸夫, 佐藤 温子
石川 潔

概 要

従来装置より高分解能で、かつ定量非破壊評価(QNDE)に適する超音波映像装置を開発した。本装置を用いて、映像分解能及び接合体界面のすき間の検出能力について検討した。その結果、シリコンの表面から $525\mu\text{m}$ の深さにおいて、
(1) 約 $50\mu\text{m}$ の方位分解能(100MHz)で映像化ができる。
(2) 5nm のすき間の検出が出来る。
(3) すき間検出性は、 $15\sim75\text{MHz}$ の範囲内では周波数に依存しない。
などのことが確認できた。

1. はじめに

超音波探査映像装置(Scanning Acoustic Tomograph: S A T)はL S I等の電子部品、C F R Pなどの複合材料、射出成形樹脂、セラミックス、チタン合金など金属、非金属を問わず多方面に亘る材料に内在するきず、き裂の観察や剥離などの検出に威力を發揮している。今回、操作性に優れ高分解能で、かつ定量非破壊評価に適した超高解像度超音波映像装置(HYE-FOCUS)を開発したので本装置の概要を述べる。またこれを契機に、本装置を用いて映像分解能および接合界面のすき間の検出能力を定量的に調べることを試みたので、併せてこれらの結果を述べる。

2. 超高解像度超音波映像装置(HYE-FOCUS)

開発した超音波映像装置の外観図を図1、構成図を図2に示す。画像形成の原理は従来開発されてきた超音波映像装置に比べて大きな変化はなく、収束させた超音波ビームを二次元に機械操作しながら反射信号強度を検出して画像を得る方式である。この装置は従来の超音波映像装置を基盤にして、さらに高分解能探触子、安定した機械走査系、高感度超音波送受信技術など、新たに開発された要素技術が結集したもので、以下の

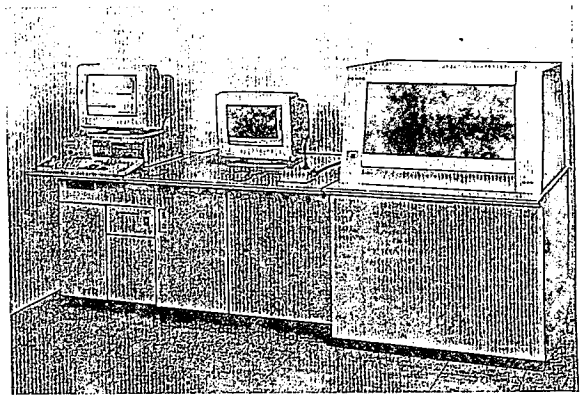


図1. High-resolution Scanning Acoustic Tomograph
(model: HYE FOCUS)

ような特長を備えている。

- (1) 1～230 MHz の広帯域周波数での映像化が出来る。
- (2) 最大300 mm口の大型試料を、広域高精度ステージを用いて高分解能測定が行える。
- (3) 操作の容易な自動試料傾斜補正機能を有する。
- (4) 低ノイズのフルコンピュータ制御高周波探傷器を使用。
- (5) 倍率1～500倍での観察が可能で、マクロ観察とマイクロ観察の切り換えが容易にできる。
- (6) 斜めスキャン (S イメージ)、測定条件登録 (イメージインデックス) 等多様な測定機能と豊富な画像処理機能が内蔵されている。

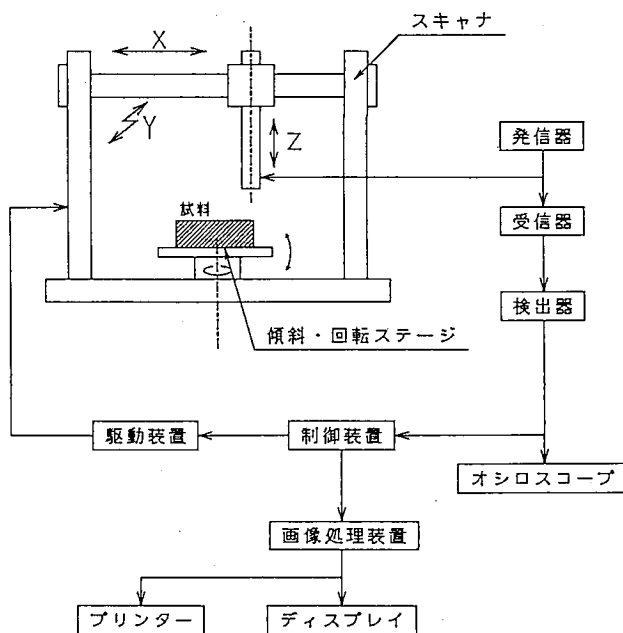


図2. Block diagram of HYE FOCUS

本装置による画像例を図3および図4に示す。図3はLSI半導体のダイボンディングのボイドを検出した例で、数十 μm の微小ボイドが明瞭に写し出されている。図4はポリプロピレン樹脂のガラス繊維の配向性を観察した例であり、フィラーの向きや形状が明瞭に観察できる。

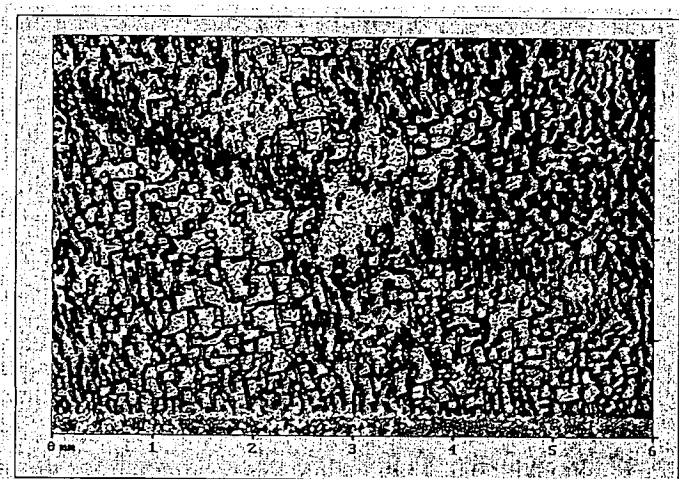


図3. Void of die bonding in LSI

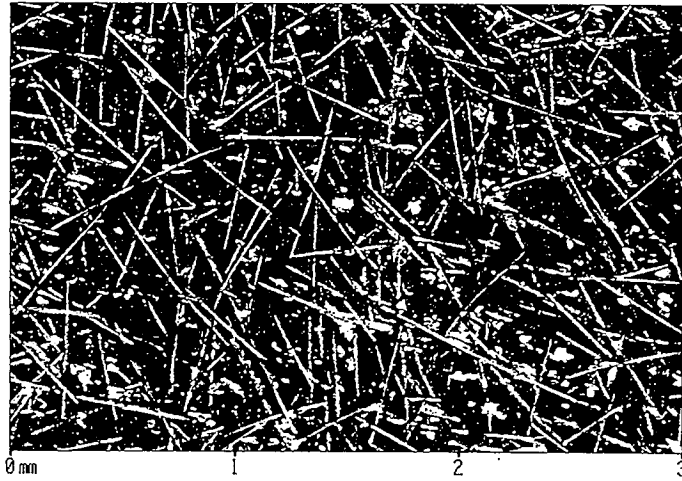


図4. Orientation of glass fiber on plastic

3. 微小のすき間の検出性

超音波を用いたすき間の検出性を定量的に測定した従来の例として、平面ガラスと凸面ガラスを重ねた、いわゆるニュートンリングによる方法がある。(1) この結果例を図5に示すが、この方法では、すき間を光の干渉縞により測定するため、波長の関係で微小領域での検出精度は必ずしもよくない。そこで、今回下記のような微小すき間の評価に適する試験体を作製し、実験を行った。また、本試験体を用いて画像の方位分解能も併せて調べた。

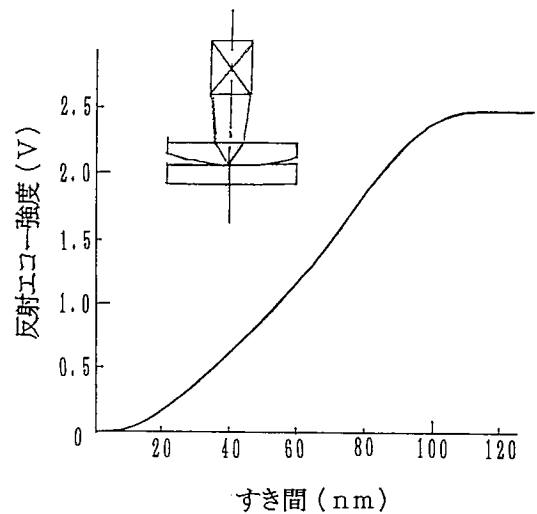


図5. Example of relationship between gap and echo amplitude

3-1. 試験体

実験に用いた試験体は図6に示すように、半導体デバイス用として用いられている直径4インチ、厚さが525 μm のシリコンウエハを貼り合わせたものである。この試験体の基板側に相当するシリコンウエハの接合面は鏡面に仕上げた。また、他方のシリコンウエハの接合面側にはエッチング技術によって所定の形状のパターンを設けた。パターンの最小形状は46 μm ×46 μm である。このパターンに対しエッチングの深さを5, 10, 20, 50, 100, 200, 500nmとそれぞれ深さの異なるものを各種作製した。このような段差を持ったウエハ基板と鏡面仕上げしたウエハとを重ね合わせ熱処理により接合すると、パターン部分は所定の厚さによく制御された空気層のすき間が実現できる。また、他の部分は完全に接着した界面を持つ試験体ができる。ここで、シリコンならびに空気の音響インピーダンス Z_s , Z_a はそれぞれ 20.04×10^6 , 4×10^{-4} ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)であるから、この試験体の上面より垂直に入射した超音波はシリコンと空気との界面ではほぼ完全に反射し、シリコンの接合部分では殆ど透過してしまう。この結果、接合部では反射超音波は最小に、段差部では反射超音波は最大となり、得られる超音波画像は接合の度合いに対応した濃淡画像となる。なお、本試験体の段差パターンの平面図を図7に示す。

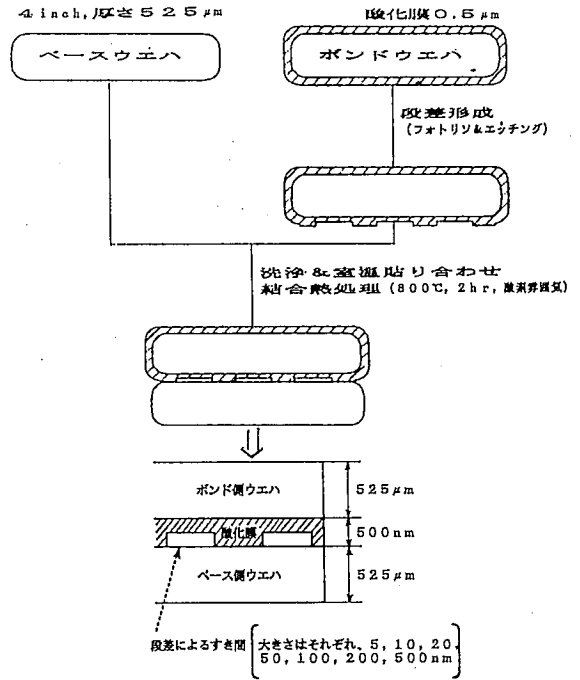


図6. Test sample

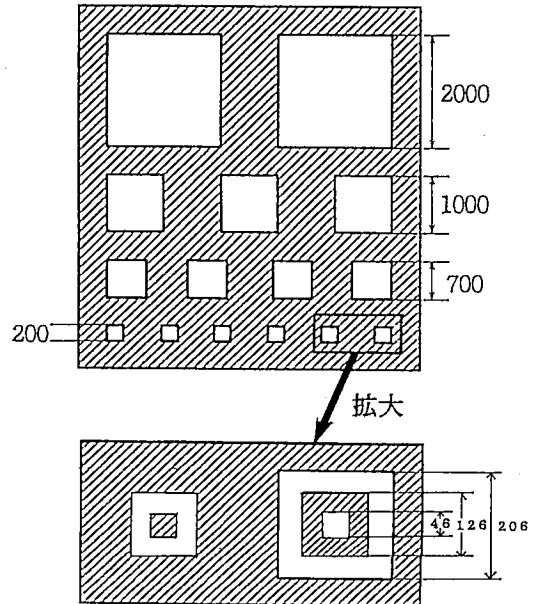


図7. Top view of etching pattern

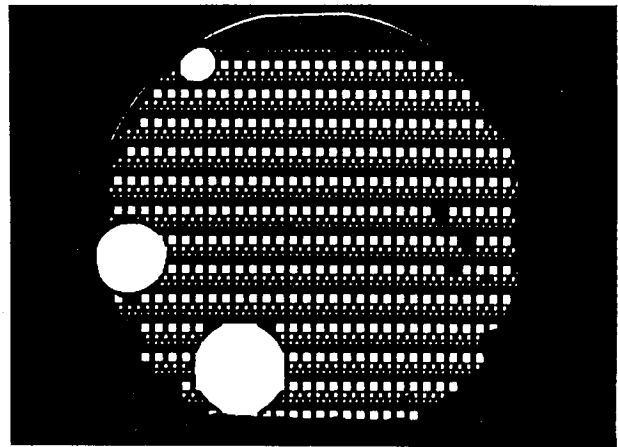
3-2 実験結果

貼り合わせシリコンウエハの試験体を観察した結果の中から代表的なものとしてすき間間隔5 nmの画像を図8に示す。使用周波数は100 MHzである。図(a)はウエハ全体像を、(b)はその一部分を拡大したものである。試験体全面にわたって、一様にパターン形状が観察されている。

(c)は最小パターン部分のみを拡大して観察した結果である。この最小パターンにおいても接合部分と段差部分の形状は明瞭に判別できることが分かった。さらに中心部の46 $\mu\text{m} \times 46 \mu\text{m}$ であるパターン形状も観察できることから、本装置では使用周波数100 MHzで約500 μm の内部における方位分解能は約50 μm 程度(シリコン材料において)を実現できることも確認できた。

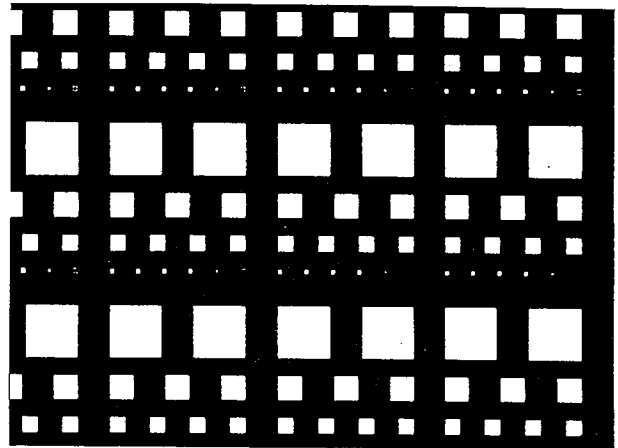
以上の結果から、本方法により超音波のすき間検出能力を調べた結果5 nmまでは確認できた。

図9はすき間間隔5 nmの試験体に対して、すき間間隔の検出性の周波数依存性を調べた結果である。周波数は15から75 MHzの範囲で行った。低周波領域では方位分解能が悪くなるので解像度はいくぶん低下する傾向があるが、画像上では大きな差は見られず、いずれの周波数においてもすき間間隔5 nmのパターンが良好に観察できた。



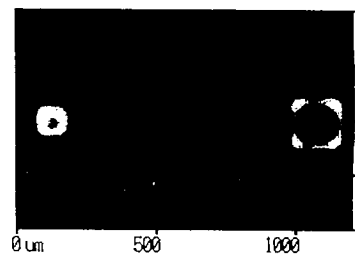
(a)

20 mm



(b)

5 mm



(c)

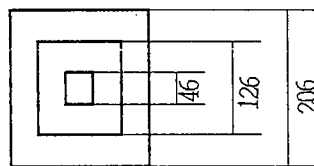


図8. Acoustic images of the contact interface of SOI (gap size=5nm)

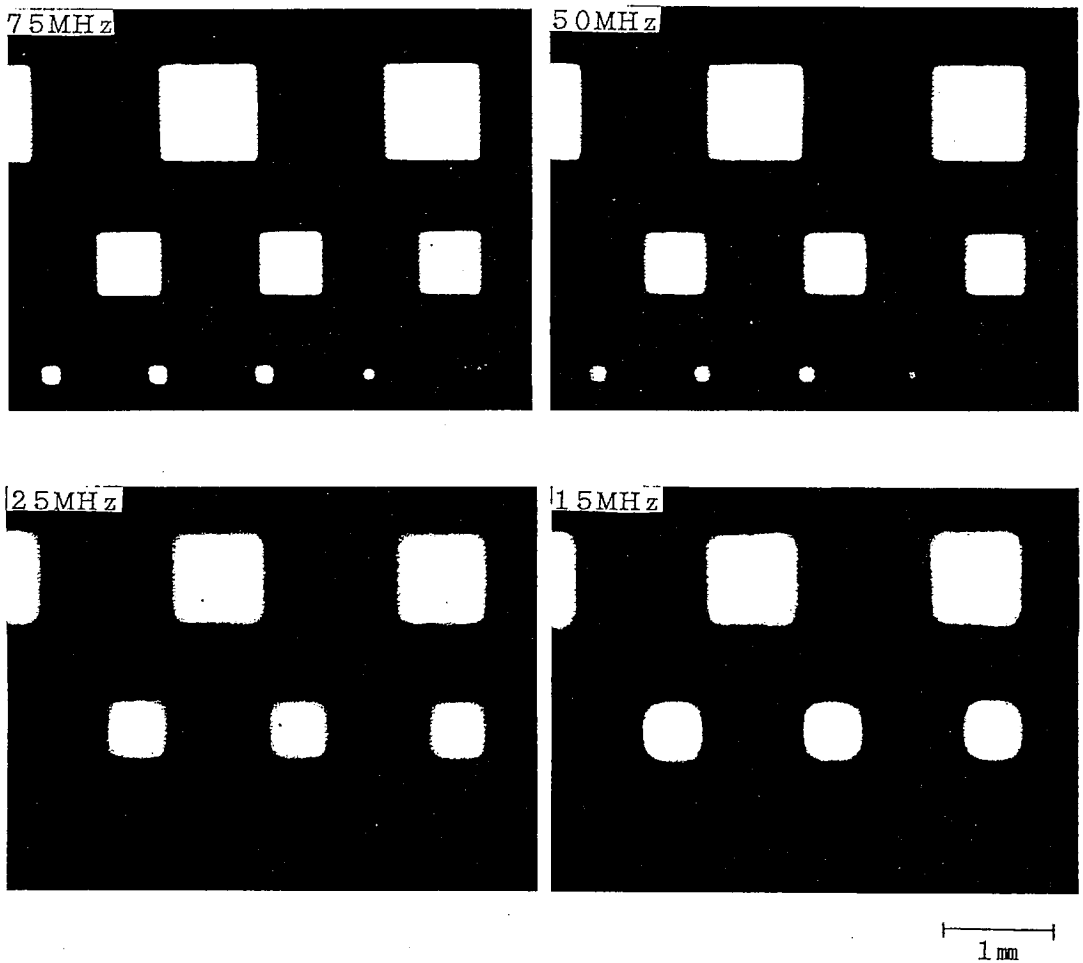


図9. Acoustic images for the gap size with different frequencies

図10に各試験体において周波数を変化させて接合界面からの反射信号強度の変化を調べた結果を示した。すき間が500 nmを基準として示してある。この結果によれば、各試験体とも周波数による反射信号強度の差は殆ど見られず、すき間間隔5 nmの試験体からも映像観察に十分な信号強度が得られることがわかった。この結果から、超音波によるすき間間隔の検出能力は5 nmよりさらに高い値にあるものと推察される。

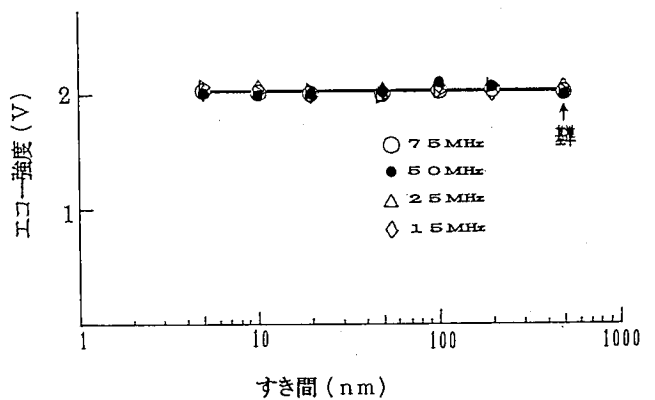


図10. Relationship between gap size and echo amplitude

4. まとめ

シリコンウエハ (525 μm) 2枚の貼り合わせを試験体として、超音波によるすき間の検出限界について検討した結果、以下のことが分かった。

表面から525 μm の深さにおいて、

(1) 5 nmのすき間の検出ができた。

(2) 方位分解能は周波数100 MHzにおいて約50 μm である。

(3) すき間検出において、周波数依存性は殆どない。(15~75 MHz)

最後に、この度の実験における試験体の作製、提供に御協力頂いた信越半導体株式会社に深謝いたします。

参考文献

- (1) 小倉：最新超音波診断技術の威力：機械設計，P112，第8巻，第17号（1994）

放射線透過写真の 12bit 画像処理

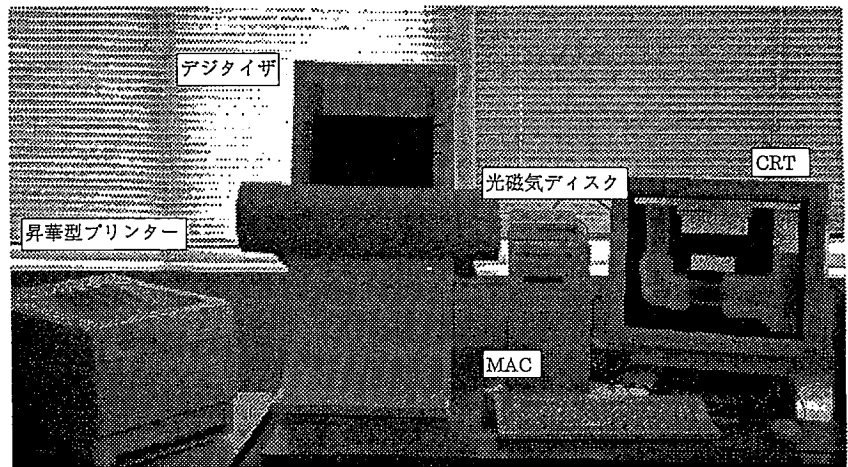
画像処理システム NIPS (Nippi Image Processing System) の配管減肉率計測への適用

日本非破壊検査(株) 木下義高 俣賀文雄

従来は高価なトータルシステムとして考えられていた画像処理システムが、高性能な画像入出力用機器やソフトウェアが簡単に利用できるようになり、パソコンやワークステーションを用いた汎用的なシステムとして構成できるようになった。NIPSは12bit デジタイザと Macintosh を中心機器として構成され、配管の減肉率計測を主な目的に OSI(On Stream Inspection)において実機に適用されている。

1. はじめに

近年、石油化学プラントにおいても定修期間の長期化が課題とされ、あるいは建設後数十年経たプラントが多くなる傾向にある。こうしたプラントの安全を担保するために、稼働中に配管や機器の減肉率を計測することは、重大な事故を防ぎ、腐食の経年変化を知ることができる方法として有効である。ガンマ線源(主として ^{192}Ir)を使った放射線透過写真は、保温材の上からでも高画質の撮影が



できるので、保温材の解体・修復による検査費用を低減でき、その経済性から多くのプラントで適用されている。

しかし従来は、撮影された透過写真をシャーカステン上でノギス等を利用して、直接に配管の残存肉厚を計測してきたが、オペレータによる差が大きい、像の拡大率を考慮した補正のための計算が必要である、検査後の透過写真のデータベース化が困難であるなどの問題点があった。

NIPS は従来と同じ現場写真を使って、デジタル化と配管の減肉率計測に最適な画像処理方法を適用することによって、オペレータによる計測誤差を減少し、画像のデジタルデータベース化を可能にする。

2. NIPS の機器構成

NIPS(Nippi Image Processing System)の機器構成は次の通りである。

- | | |
|-------------------|-------------------------|
| ● 12bit フィルムデジタイザ | Vidar System Co. VXR-12 |
| ● パソコン | Power Macintosh 8100/80 |
| ● 昇華型プリンター | シャープ JX-7500M |
| ● 光磁気ディスク | 三菱化成 MK230E |
| ● 21 インチ CRT | 飯山電機 |

3. NIPS の特徴

12bit の画像解像度

12bit(4096 階調)の画像解像度を有している。パソコン上で扱うほとんどの画像ソフトは、グレースケールでは 8bit(256 階調)の画像解像度しか取り扱うことができない。また、医療用の放射線画像処理システム FCR(Fuji Computed Radiography)でも 10bit の解像度である。12bit 画像データを取り扱えることが、NIPS の最大の特徴である。

濃度変換テーブル

デジタイザ自身が数種類のハードの濃度変換テーブルを備えているので、フィルムの濃度分布にたいして最適な濃度変換を行なうことができる。リニア、平方根、対数、リニア O.D.などのテーブルがあり、ユーザーの作成した変換テーブルを組み込んで使うことも簡単にできる。

半切サイズまで 300dpi で読み込み

半切サイズ(17in×14in)の透過写真を 300dpi でスキャンすることができる。その時のデジタル化に必要な時間は 54 秒である。OSI においては四切サイズ(12in×10in)が主流であり 150dpi での読み込み処理を行なっている。この場合 28 秒で読み込むことができ、1 枚の透過写真にたいして約 2.5Mbyte のメモリが必要になる。

測定機能

キャリブレーション付きの距離測定、角度、重心、面積、周囲長などの測定機能が充

実している。透過写真上の既知の部分の距離をもとにしてキャリブレーションをしておけば、マウスで指定した任意の測定距離を補正して計測値を出力することができる。

画像処理

コントラスト強調、エッジ化、スムージングなどの一般的な画像処理方法はほとんど備えている。また、各種のフィルター類も充実しており、ユーザー作成のフィルターも使用が可能である。

保存および画像データベース

3.5in 倍密の光磁気ディスクに約 100 枚の透過写真が保存できる(四切フィルムを150dpi でスキャンした場合)。画像データの圧縮を利用すれば更に 20 倍程度の保存が可能である。

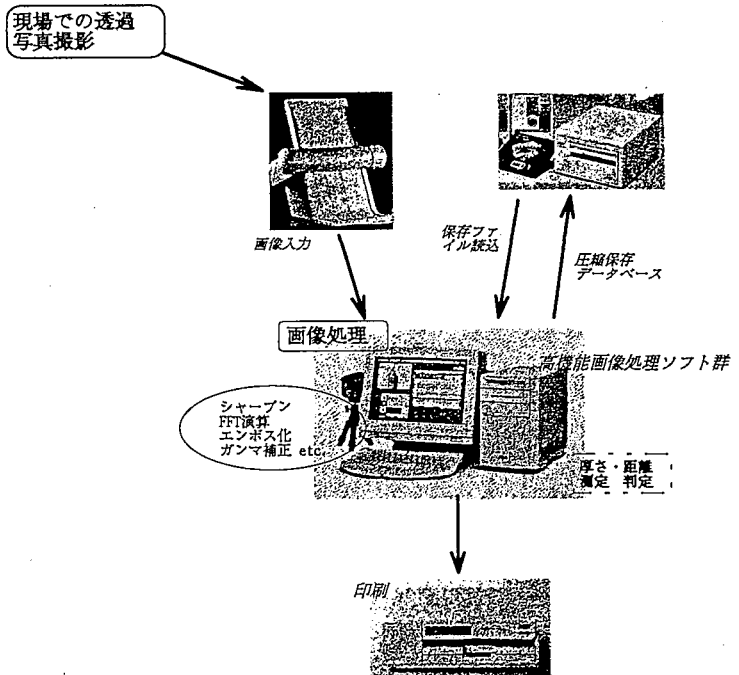
データの保存フォーマットは TIFF(Tagged Image File Format)を採用している。そのほかのファイル形式 PICT, JPEG, EPS, Photoshop, IPLub などにも対応している。画像データベースソフトと連動して、透過写真のデジタルデータをデータベース化でき、配管減肉の経年変化の観察が容易にできる。

4. 配管の減肉率計測

OSI における配管の減肉率計測のフローチャートを右図に示す。

現場での透過写真の撮影および現像処理は今までと同じであり、デジタイザによるスキャンの後はほとんどがマウスによる操作である。

以下に、画像処理の部分の手順を詳細に説明する。



画像処理の作業フロー

コントラスト強調

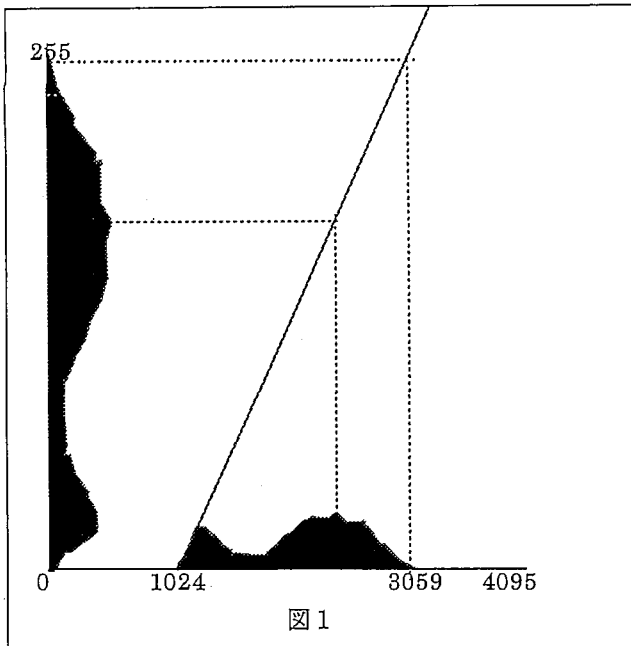


図1

図1はコントラスト強調の原理を図解した濃度ヒストグラムである。CRT表示、プリンター出力ともに、現在の時点では8bit(256階調)の表示が限界であるので、12bit(4096階調)のデータの注目部のみを効率よく0から255の階調に変換することで、コントラストの良い透過写真になる。

図2はスキャンしたままで何も処理を施していない状態の画像である。全体に透過写真の濃度が低く、計測対象である配管の残存肉厚を測定するには、管の外縁部と内縁部の境界がもっと明確になる必要がある。図3は最適なコントラストになるようにデータ変換をした

画像である。12bit(4096階調)の豊富な画像データから、検査で注目する部位のみを選択的に、最適なコントラストになるように変換することができる。その結果図3では、空間部と外縁部、内縁部がくっきりとく分かるようになるが、しかし、外縁部には散乱線によるかぶりがあり、このまま計測すると過小に測定するおそれがある。

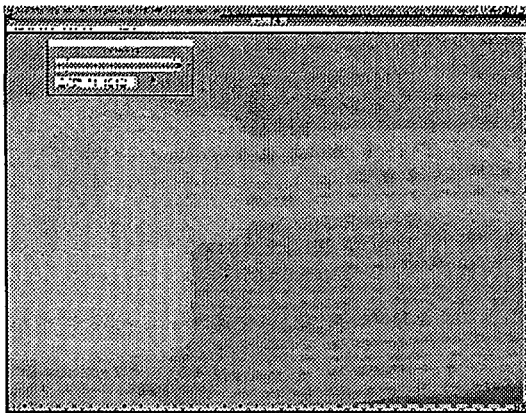


図2 原画像

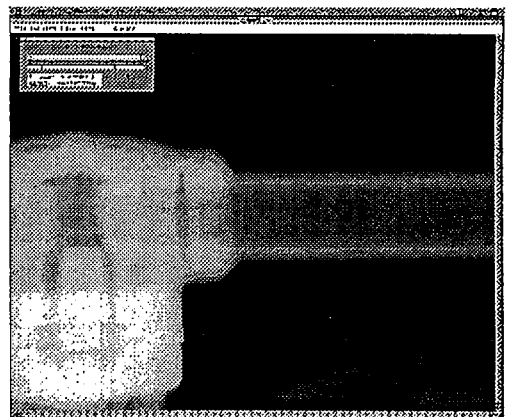


図3 コントラスト強調

雑音除去

デジタル化によってスキャンされた画像データには、電圧変動・量子化誤差・物理的変動などのさまざまな要因による雑音(誤差)成分が含まれている。

平滑化(スムージング)することによってこの誤差成分を減少させることができるが、同時に画像のピークがつぶれるなどの影響もでる。比較的影響の少ない平滑化法としてメディアンフィルターを採用する。

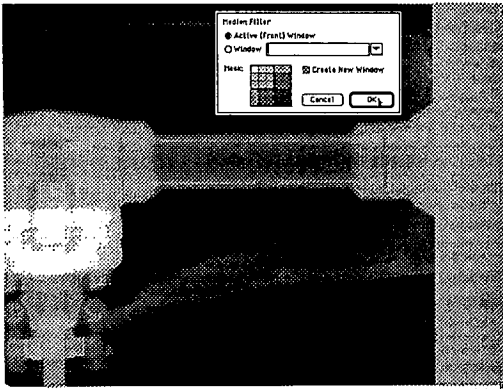


図 4

メディアンフィルターは注目しているピクセルを中心として、その周囲 3×3 (ソフト上は 5×5 まで可能) の領域の 9 個の濃度値のなかの中央値 (メディアン) を注目するピクセルの値と置き換える処理を行なうフィルターである。

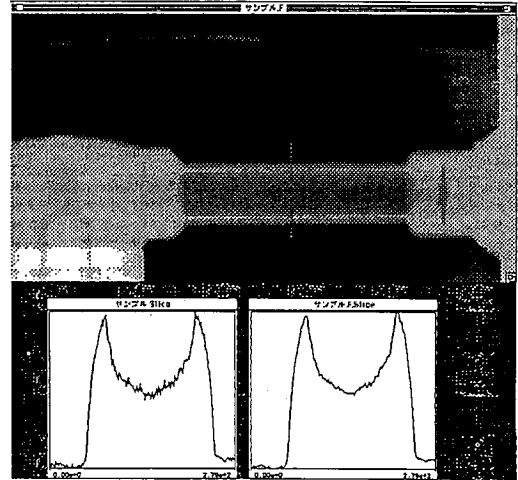


図 5

図 4 にメディアンフィルターの選択画面とフィルターをかける前の画像、図 5 には操作後の雑音除去の様子を示す。図 5 の中の二つの濃度断面グラフは、配管の円周方向断面部の濃度分布をプロットしたものである。左が雑音除去前のグラフであり、右が除去後のグラフである。メディアンフィルターを使用すれば、ピークがつぶれずに雑音成分が効果的に除去されていることが分かる。

輪郭強調

配管の残肉厚計測を行なう場合に、管の境界を決定することが比較的難しく、そのことが計測誤差やオペレータによる計測差の大きな原因となっている。エッジ化フィルターは画像全体にたいして図のような 5×5 のマトリックスを掛けて、注目するピクセルの濃度値を他のピクセルよりも強調するフィルターである。

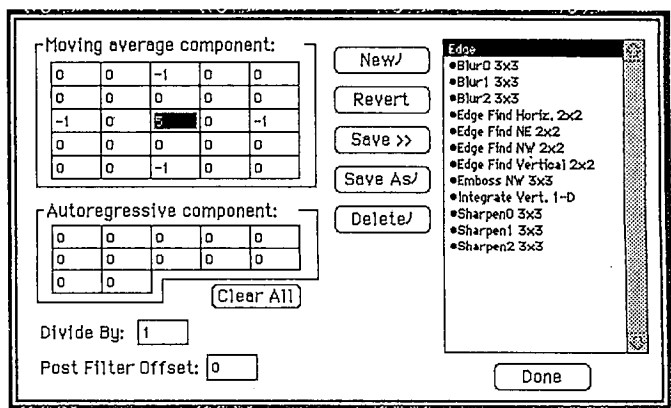


図 6

図6はエッジ化フィルターの例であり、ユーザーが任意のマトリックスを作成してフィルターとして登録することができる。

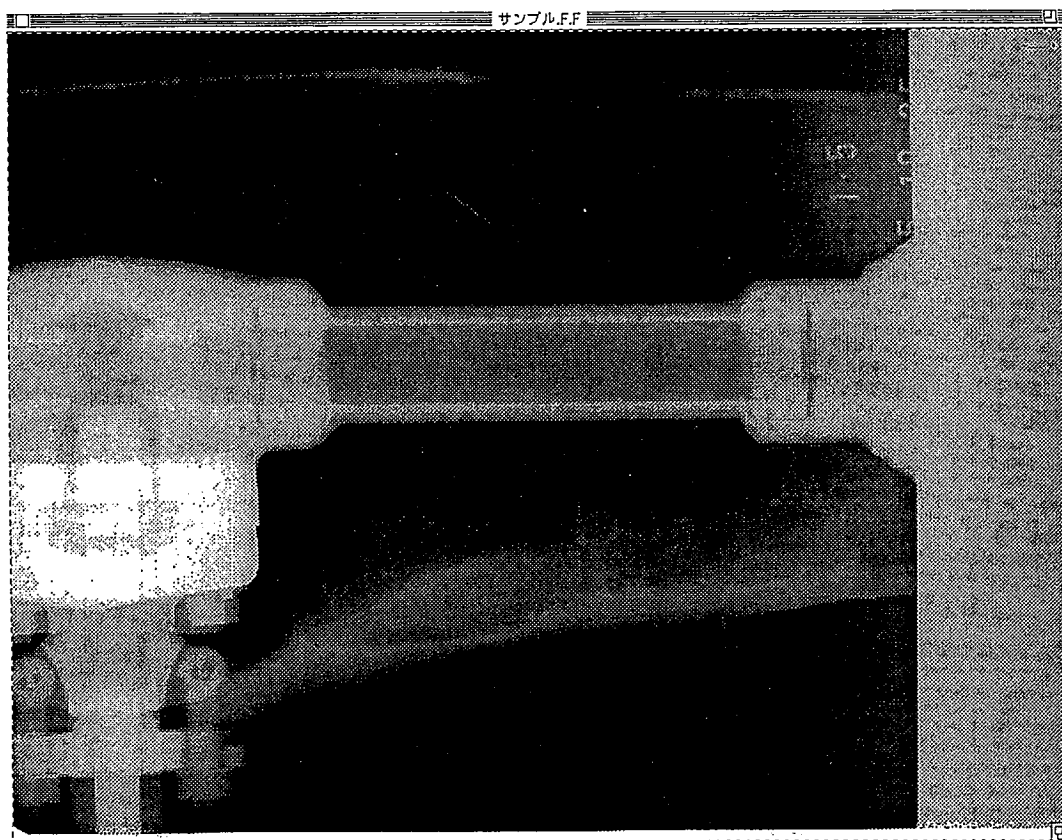


図7

図7に輪郭強調後の透過写真を示す。図2の原画像と比較してみれば、保温材の部分からバルブの厚肉部にいたるまで、高品位に画像が表示されていることが分かる。

豊富な情報量の12bit画像データに、一連の画像処理手法を適用することによって、低コントラスト・低濃度の透過写真を、高コントラストなものに変換することができる。

以上の統一された操作を行なうことで、透過写真上での配管減肉率の測定精度を向上させることが可能となる。

計測・キャリブレーション

撮影された透過写真は、撮影の幾何学的配置による像の拡大がある。従来は、撮影配置から計算によって拡大率を求め、フィルム上で計測した残存厚さを拡大率で補正することによって真の厚さを計算していた。

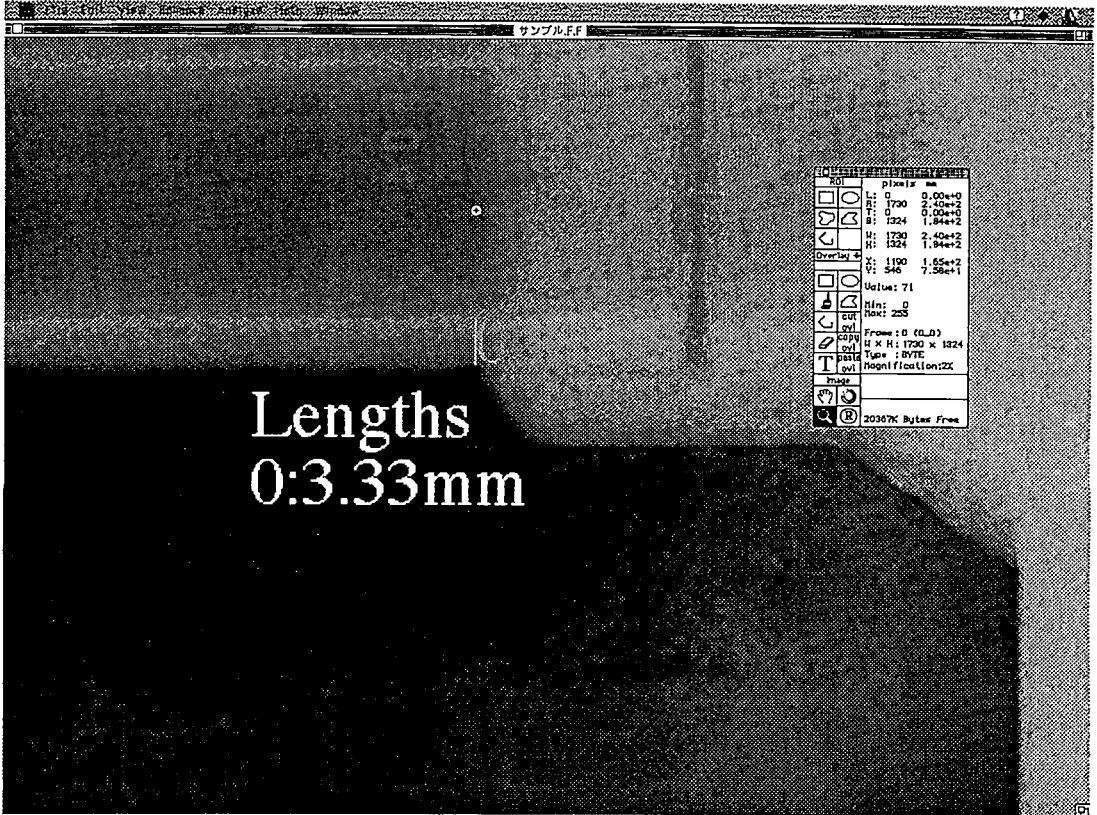


図 8

当システムでは、フィルム上の既知の長さやあるいは既知の長さの標準片を透過写真に同時に写しておくことによって、キャリブレーションを設定することができる。設定後は任意の箇所をマウスでクリックすることで、補正された値が計算されて画面上に表示される。図 8 は計測結果を画面に表示したものである。

5. おわりに

Macintosh 上で放射線透過写真の画像処理ができるシステムを構築し、現場に適用したが、オペレータによる計測値の違いが減少するなど、OSI での配管減肉率計測の精度向上に有効であった。その後の研究により、計測の自動化と画像データベースの構築も進展している。また、Windows 上でも画像データの処理・閲覧が可能になった。今後は、基礎データの収集に努めるとともに、コンクリート・溶接部への適用のための研究を行いたい。

角形鋼管柱溶接角部の超音波探傷試験方法に関する実験

Technical reports on ultrasonic examination for curved welds
of corner portions of carbon steel square pipes

212小委員会
委員長 倉持 貢

概要

角形鋼管柱溶接角部の超音波探傷試験方法について、ワーキンググループを(WG)を設置し、検討を行った。

1. 探傷感度は10dB上げることによって平板部と同等の結果が得られた。
2. 5M10×10A70で接触面に曲面加工を行わなくてもエコー高さ及びきずの指示長さの測定に支障はなかった。

WG委員構成表

リーダー；	松村民久	日本検査コンサルタント(株)
幹事；	立川克美	千葉県機械金属試験場
	加藤 功	(株)検査技術研究所
委員；	荒井 均	キューシーコンサルタント(株)
	岡 賢治	(株)検査技術研究所
	柏瀬一彦	東京理学検査(株)
	倉持 貢	清水建設(株)技術研究所
	城島保茂	(株)東京鐵骨橋梁製作所
	高橋雅和	日本鋳鉄管(株)
	堀部信義	アイ・シー・ティ(株)

1. はじめに

角形鋼管柱の柱継手または柱材と通しダイヤフラムなど柱軸と直交する(図1)溶接部の角部は探傷面の曲率が小さい。そのため角部の超音波探傷には日本建築学会の超音波探傷検査規準あるいはJIS Z 3060(鋼溶接部の超音波探傷試験方法)が適用ができない場合が多い。

建築鉄骨に使用される角形鋼管の板厚は9mmから19mm程度が多く、角部の曲率半径は18mmから50mm程度である。曲率が日本建築学会(直径300mm以上の円周継手)あるいは、JIS Z 3060(付属書2 円周継手溶接部の探傷方法 曲率半径50mm以上)の適用範囲外であるから超音波探傷検査は行わないか、あるいは暫定的な方法を適用している。

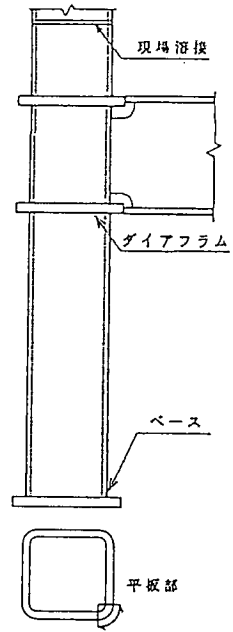
この角部は、溶接施工上組立溶接や溶接始、終端部の位置となり、また裏あて金の密着性が悪くなるなど、溶接部の内部欠陥の発生しやすい箇所である。また、角形鋼管は一般に冷間で成型されるために残留応力や加工硬化の影響で、角部の溶接欠陥から母材の割れ

を誘発することもある。一方、角部の断面積は角形鋼管柱の全断面積の20%前後と大きい。

曲率の小さな探傷面から超音波斜角探傷を行う場合、探触子の接触面は探傷面に対して線接触となるために超音波の伝達損失が生じ、さらに1回反射法による場合には内面で超音波が拡散してエコー高さを低下させる。このためにJIS Z 3060では曲率の小さな円周継手の探傷は探触子の接触面に曲面加工を行ったうえで対比試験片を用いて感度調整をし、探傷を行うことを規定している。ところが、円形断面を有する鋼管と異なり角形鋼管の場合には4辺の平面からの探傷と角部の曲率を有する面からの探傷が連続するから、探傷は複雑となる。

角形鋼管柱の超音波探傷について立川¹⁾らの研究によれば、5Z10x10A70の探触子で接触面に局面加工を行わないで角部の外半径に応じた感度補正を行い、欠陥指示長さの測定限界を最大エコー高さの-12dBで測定を行えば、欠陥長さの実測値との対応性がよいと言われている。

そこで、本小委員会では角形鋼管柱溶接角部の超音波検査方法についてのWGを設置し、あまり煩雑にならない方法によって平板部の溶接と同等に評価することを目的として実験検討を行うことにした。



角部（コーナー部）

図1 角形鋼管柱

2. 実験の準備

2.1 実験の方針

STB-A2を用いて作成したエコー高さ区分線を用い、感度補正量を求めるための実験を行う。次に求めた感度補正量を適用して欠陥指示長さの測定を行ってその結果を検討する。以上の方針のもとに実験を計画した。

2.2 試験片

1) 試験片の板厚及び角部の曲率は一般に使用されている角形鋼管を考慮して材質はSTKR-400とし、表1に示す範囲とた。

2) スリットの加工は放電加工により、表2に示す寸法とした。

3) 感度比較のためにφ4x4の平底穴を配置した。

4) 人工きずの配置を表3及び図2に示す。

表1 実験の範囲

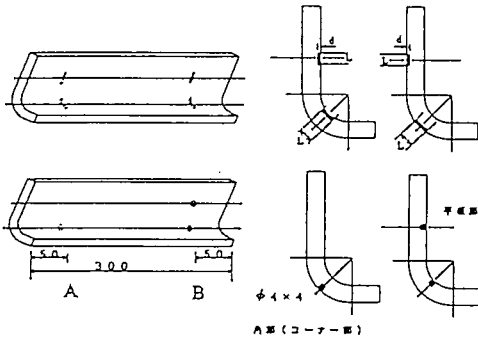
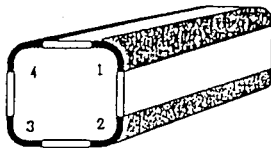
r/t	2.0	2.5	3.0	3.5
9	●	●		
12	●	●		
16		●		
19		●	●	
22				

●：実験範囲

r：角部の外半径 t：板厚

表2 スリットの加工

長さ	5	10	20
0.5			●
1.0	●	●	●
1.5			●
2.0			●



スリットの形状：矩形
 スリットの幅：0.5mm

図2 試験片の形状と人工きずの配置

表3 試験片のきずの大きさと加工位置

試験片 No. 傷 r/t 位置	平板部		角部	
	A	B	A	B
1-9-2.0-1			φ4×4 内	φ4×4 外
			1.0×10内	1.0×10外
2-9-2.5-1	φ4×4 内		φ4×4 内	φ4×4 外
			1.0×5内	0.5×15内
			1.0×10内	1.0×15内
			1.0×15外	2.0×15内
3-12-2.5-1			φ4×4 内	φ4×4 外
3-12-2.0-3			1.0×15内	1.0×15外
4-12-2.5-1	φ4×4 内		φ4×4 内	φ4×4 外
			1.0×15内	1.0×15外
6-16-2.5-1	φ4×4 内		φ4×4 内	φ4×4 外
	1.0×5内	0.5×15内	1.0×5内	0.5×15内
	1.0×10内	1.0×15内	1.0×10内	1.0×15内
		2.0×15内	1.0×15外	2.0×15内
7-19-2.5-1	φ4×4 内		φ4×4 内	φ4×4 外
			1.0×15内	1.0×15外
10-19-3.0-2			φ4×4 内	φ4×4 外
			1.0×15内	1.0×15外

内：内面に加工 外：外面に加工

2.3. 実験装置

- 1) 探傷器：USK-7S；クラウトクレーマー社製
- 2) 探触子：5Z10×10A70(STB屈折角：69.5°)；ジャパンプローブ社製
- 3) 標準試験片：STB-A1, STB-A2
- 4) 接触媒質：グリセリン

3. 実験方法

探触子の接触面に局面加工は行わず、複数の測定者によって下記の2項目について実験を行った。

3.1 エコー高さ

角部の平板部に対する感度補正量を検討するために、STB-A2のφ4×4のエコー高さを基準として、平板部及び角部試験片のφ4×4及びスリットのエコー高さを測定した。

3.2 きずの指示長さ

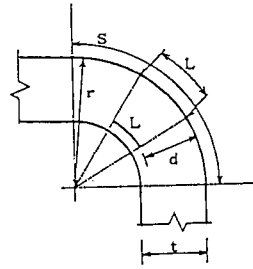
前項の実験結果を検討して感度補正量を決め、感度補正を行って試験片の平板部及び角部のスリットのきずの指示長さを測定した。

角部のきずの指示長さは、角部の曲率ときずの深さ位置の影響で左右走査における探触子の移動量から、図3に示す方法によって求めた。

4. 結果, 考察

4.1 エコー高さ

接触媒質の塗布が過剰にならないように注意することによって角部のエコー高さの最大は容易にとらえることができ、かつ、再現性も良好であった。



$$L = (1 - d/r) \times L'$$

L' = 探触子の移動距離
 r = 角部の外半径
 d = きずの深さ
 t = 板厚

図3 角部のきずの指示長さの求め方

(1) φ4×4の場合

平板部及び角部に加工したφ4×4の平底穴を用いてエコー高さを比較した結果を表4に示す。測定値はそれぞれ複数の測定者の平均値である。

平板部に比較して角部のエコー高さは角部の曲率半径と探傷方法(直射法か1回反射法)によって差が認められる。表4のF部との差は平板部と角部のエコー高さの差を示すが、角部の曲率が小さい場合($r/t:2.0$)その差は14dB, $r/t:2.5$ の場合には10dB, $r/t:3.0$ の場合には6dB程度となり、1回反射法ではさらにそれぞれ、6dB程度低くなる。

(2) スリットの場合

平板部と角部に加工したスリットを用いてエコー高さを比較した結果を表5に示す。

平板部のスリットは板

厚16mmのみに加工しているため、16mm以外の板厚については図4に示す通り16mmの平板部のエコー高さをもとに外挿して平板部のエコー高さを求め、それぞれの板厚の角部のエコー

表4 角部の相対エコー高さの比較 (14×4)

試験片	寸	F (平板部)								R (角部)			
		0.5S (内面)		1.0S (外面)		0.5S (内面)		1.0S (外面)		F#と0L (dB)			
		W(mm)	H(dB)	W(mm)	H(dB)	W(mm)	H(dB)	W(mm)	H(dB)	0.5S	1.0S		
9-2.0	14×4	9						27.7	-12.2	56.3	-21.5	-14.5	-19.0
9-2.5	14×4	9	26.5	2.3	51.3	-2.5	24.3	-7.3	48.9	-18.3	-9.6	-15.8	
12-2.5	14×4	12					34.8	-5.9	65.0	-20.3	-8.2	-18.3	
12-2.5	14×4	12	33.6	2.3	66.1	-2.0	35.0	-8.5	63.8	-20.4	-10.8	-18.4	
16-2.5	14×4	16	44.5	1.0	89.7	-9.7	45.4	-8.9	86.6	-24.7	-9.9	-15.0	
19-2.5	14×4	19	52.6	-2.3	101.8	-11.4	52.8	-13.3	103.0	-25.2	-11.0	-13.8	
19-3.0	14×4	19					55.7	-8.0	107.4	-21.8	-5.7	-10.4	

H (dB): STB-A2 0.5Sを基準
 W (mm): ビーム路程

表5 角部の相対エコー高さの比較 スリット傷の場合

試験片	寸	F (平板部)								R (角部)			
		0.5S (内面)		1.0S (外面)		0.5S (内面)		1.0S (外面)		F#と0L (dB)			
		W(mm)	H(dB)	W(mm)	H(dB)	W(mm)	H(dB)	W(mm)	H(dB)	0.5S	1.0S		
9-2.0	1.0-10	9						27.2	-8.3	53.0	-15.0	-16.4	-17.6
9-2.5	0.5-15	9						25.2				-13.7	
	1.0-5	9						25.5				-14.0	
	1.0-10	9						24.2				-15.1	
	1.0-15	9						23.8		47.2	-15.0	-14.9	-18.2
12-2.0	1.0-15	9						24.0				-19.0	
	2.0-15	9						24.0				-19.0	
12-2.0	1.0-15	12					33.7		65.0	-19.5	-12.9	-18.9	
12-2.5	1.0-15	12					33.7		68.5	-14.0	-12.9	-12.6	
16-2.5	0.5-15	16	44.2	-8.5	81.8	-17.7	44.5	-19.7				-11.2	
	1.0-5	16	44.7	1.8	88.2	-8.2	45.2	-7.2				-9.0	
	1.0-10	16	46.2	4.0	89.7	-4.3	45.8	-7.3				-11.3	
	1.0-15	16	46.0	3.5	87.8	-5.8	46.2	-6.0	89.2	-15.0	-9.5	-9.2	
	2.0-15	16	45.8	9.5	91.7	0.3	45.5	-1.7				-11.2	
19-2.5	1.0-15	19					53.0	-7.5	101.7	-17.8	-9.5	-9.2	
19-3.0	1.0-15	19					54.8	-7.5	107.2	-16.5	-9.1	-6.8	

H (dB): STB-A2 0.5Sを基準
 W (mm): ビーム路程

一高さと比較した。

この結果によると、 $\phi 4 \times 4$ の縦穴では直射法と1回反射法ではほぼ6dBの差がある。

ところが、スリットでは直射法と1回反射法ではほぼ同じである。これはきずの形状の差異によるものと推察される。

$\phi 4 \times 4$ の縦穴は超音波が拡散されるのに対して、スリットは超音波が集束される傾向にあるためと思われる。

これらの実験結果から実際の溶接部の欠陥を考慮して溶込み不良及び融合不良などの検出を重点に考えると、スリットの結果をもとに感度補正量を決めるのが妥当と考られる。

基準感度 (STB-A2 $\phi 4 \times 4$) に対して、10dB探傷感度を高めれば各スリットのエコー高さは図5に示すように平板部に加工したスリットのエコー高さを同等に評価することができる。

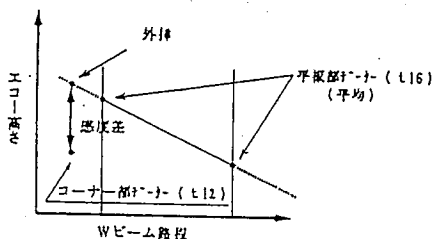


図4 角部の感度差

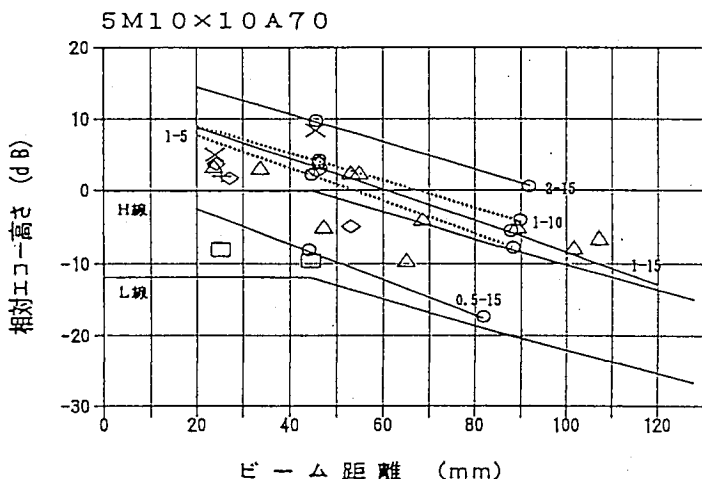


図5 平板部と角部のスリットによるエコー高さの比較
(角部の感度補正 +10dB)

スリットの寸法とシンボル

深さ	長さ	コーナー部	平板部
0.5	15	□	○
1.0	5	+	○
1.0	10	◇	○
1.0	15	△	○
2.0	15	×	○

単位 (mm)

以上により角部に対する感度補正量は10dBとした。

4.2 きずの指示長さ

平板部の場合は基準感度、角部の場合は基準感度+10dBでL線カット法を適用し、スリットきずの指示長さを測定した。角部の指示長さの測定においても探触子の接触面が平らなための問題はなかった。測定結果は表6に示通りである。平板部も角部も実長に対していずれも長めに測定されている。

一方、平板部と角部の測定値の差で整理してみると、図6に示す通り差は少ない。この

ことから平板部と角部で指示長さに関しては同等の結果が期待できる。

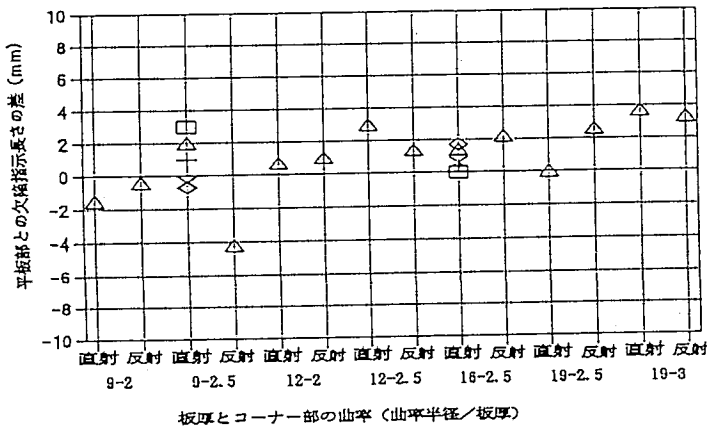
また、実長に対して長めに測定されているのはスリットの形状が矩形状であることにも一因があるように思われる。

以上のことから、実用的に見てあまり繁雑でない方法で目的に対応すると思われる。

表6 欠陥指示長さ(スリット)

単位 mm

試験片	スリット 長さ-実長	F (平板部)				R (角部)					
		0.5 S		1 S		0.5 S		1 S			
		平均	実長 ±0差	平均	実長 ±0差	平均	実長 ±0差	F部 ±0差	平均	実長 ±0差	F部 ±0差
9-2.0	1.0-10					13.7	3.7	-1.3	14.3	-0.7	-0.4
9-2.5	0.5-15					17.0	2.0	3.0			
	1.0-5					10.7	5.7	1.0			
	1.0-10					14.3	4.3	-0.7			
	1.0-15					16.3	1.3	-2.0	15.8	0.8	-4.2
	2.0-15					20.3	5.3	-0.4			
12-2.0	1.0-15					19.0	4.0	0.7	21.0	6.0	1.0
12-2.5	1.0-15					21.3	6.3	3.0	21.4	6.4	1.4
16-2.5	0.5-15	14.0	-1.0	12.0	-3.0	14.0	-1.0	0.0			
	1.0-5	9.7	4.7	10.7	5.7	10.0	5.0	0.3			
	1.0-10	15.0	5.0	14.7	4.7	16.7	6.7	1.7			
	1.0-15	18.3	3.3	20.0	5.0	19.7	4.7	1.4	22.2	7.2	2.2
	2.0-15	20.7	5.7	21.7	6.7	21.3	6.3	0.6			
19-2.5	1.0-15					18.3	3.3	0.0	22.6	7.6	2.6
19-3.0	1.0-15					22.0	7.0	3.7	23.3	8.3	3.3



スリットの寸法

深さ	長さ	シンボル
0.5	15	□
1.0	5	+
1.0	10	◇
1.0	15	△
2.0	15	×

単位 (mm)

図6 角部のきずの指示長さの測定精度

5. まとめ

角形鋼管柱溶接角部の探傷について実験検討した。

- 1) 5Z10X10A70の探触子の接触面に局面加工を行わなくても角部の探傷に支障はない。
- 2) STB-A2のφ4X4を用いて作成したエコー高さ区分線を使用し、+10dBの感度補正を行えば、平板部と同等な結果を得ることが期待できる。
- 3) きずの指示長さは、前項の補正した感度のままで、L線カット法で容易に測定できてバラツキも少ない。

以上

[文 献]

立川克美, 白井越朗; 平成3年度研究報告(千葉県機械金属試験場) No. 21

角形鋼管柱溶接角部の超音波探傷試験方法 指針 (案)

The guideline on ultrasonic examination for curved welds
of corner portions of carbon steel square pipes

212 小委員会
委員長 倉持 貢

概 要

本報告は212小委員会指針案であって角形鋼管柱溶接角部の超音波探傷試験方法検討ワーキンググループによって曲率の小さな角形鋼管柱溶接角部の超音波探傷試験の方法について検討した。

(1) 曲率の小さな角部の検査に5M10×10A70の探触子を用い探傷を行う場合の探傷感度を感度補正量として実験により求めた。

(2) 探傷面の曲率ときずの深さによって長さを補正することによりきずの指示長さは平板部と同等に評価できる。

角形鋼管柱溶接角部の超音波探傷試験方法検討WG委員構成表

リーダー;	松村民久	日本検査コンサルタント(株)
幹 事;	立川克美	千葉県機械金属試験場
	加藤 功	(株)検査技術研究所
委 員;	荒井 均	キューシーコンサルタント(株)
	岡 賢治	(株)検査技術研究所
	柏瀬一彦	東京理学検査(株)
	倉持 貢	清水建設(株)技術研究所
	城島保茂	(株)東京鉄骨橋梁製作所
	高橋雅和	日本鋳鉄管(株)
	堀部信義	アイ・シー・ティ(株)

はじめに

建築鉄骨などに用いられる角形鋼管柱溶接部の角部は探傷面の曲率が小さく、JIS Z 3060「鋼溶接部の超音波探傷試験方法」あるいは日本建築学会の超音波探傷検査規準の適用からはずれるために超音波探傷検査を行わないか、あるいは暫定的な方法で適用されている。

この角部は、溶接施工上欠陥が発生しやすい箇所であり、溶接品質を確保する上で試験方法の確立が望まれている。

そこで212小委員会では角形鋼管柱溶接角部の超音波探傷試験方法検討WGを発足させ検討を重ねてきた。この結果をまとめ、一応の結論が得られたのでここに「角形鋼管柱溶接角部の超音波探傷試験方法(指針)」として示す。

1 総則

1.1 適用範囲

この指針は探傷部の板厚が9 mm以上19 mm以下の角形鋼管柱溶接部のうち、角部の超音波斜角探傷試験に適用する。

探傷は外面から直射法または1回反射法による。

1.2 一般事項

本指針に規定する以外の一般事項は日本建築学会「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説」及びJIS Z 3060「鋼溶接部の超音波探傷試験方法」による。

2 探傷方法

2.1 探触子

使用する探触子は5M10×10A70とし、探触子の接触面は曲面加工は行わない。

2.2 接触媒質の塗布

接触媒質はうすく一様に塗布する。

2.3 エコー高さ区分線

A2形系標準試験片の $\phi 4 \times 4$ mmにより作成した距離振幅特性曲線によるエコー高さ区分線を使用する。

2.4 探傷感度

A2形系標準試験片の $\phi 4 \times 4$ mmのエコー高さをH線に合わせた後10 dB感度を高め、これを探傷感度とする。

2.5 探触子の走査

図1に示すように探触子の音軸方向と角部の法線方向が一致するように探触子の向きを管軸方向に向け、探触子の幅の中心を接触させて走査する。

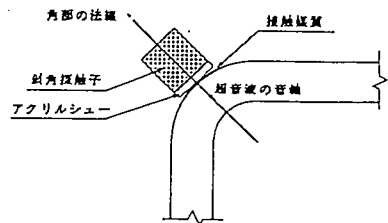


図1 探触子の走査

2.6 きずの指示長さの測定

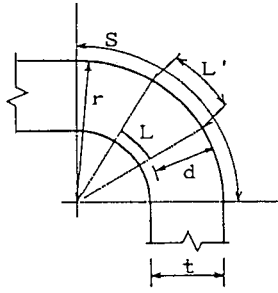
(a) 走査方法

最大エコー高さを示す探触子溶接部距離において左右走査を行う。若干の前後走査は行うが首振り走査は行わない。

(b) 測定方法

エコー高さがL線を超える範囲の探触子の移動距離を探傷面上で測定し、次式によって補正する。きずの指示長さの単位は1 mmとする。

$$L = (1 - d/r) \times L'$$



- L : きずの指示長さ
- L' : 探触子の移動距離
- d : きずの探傷面からの深さ
- r : 角部の曲率半径 (外径)
 $r = 2 \cdot S / \pi$
- S : 角部の表面の長さ
- t : 板厚

図 2 きずの指示長さの求め方

2.7 きずの位置の表示

きずの溶接線方向の位置の表示は探傷面上のきずの始端位置とする。

平板部と角部を1つの溶接単位として評価する場合のきずの位置の基準は平板部の始端とする。平板部と角部をそれぞれ個別に評価する必要がある場合の角部のきずの位置は角部の始端を基準として表示する。

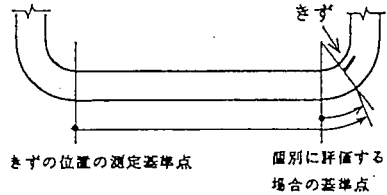
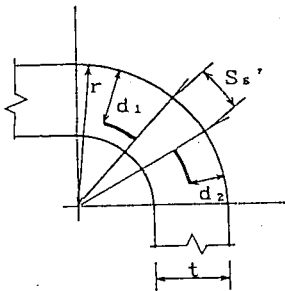


図 3 きずの位置の表示

2.8 きずときずの間隔

同一きず群とみなされるきずときずの間隔は探傷面上で測定したきずときずとの間隔及び2個のきずの深さの平均値次式によって求める。



きずときずの間隔 S_s

$$S_s = S_s' \times (r - d) / r$$

$$d = (d_1 + d_2) / 2$$

図 4 きずときずの間隔の求め方

はじめに

建築鉄骨などに用いられる角形鋼管柱溶接部の角部は探傷面の曲率が小さく、JIS Z 3060「鋼溶接部の超音波探傷試験方法」あるいは日本建築学会の超音波探傷検査規準の適用からはずれるために超音波探傷検査を行わないか、あるいは暫定的な方法で適用されている。

この角部は溶接施工上から組立溶接、溶接始末端部の位置となり、また裏あて金の密着不良などから溶接欠陥の発生しやすい箇所である。また角形鋼管は冷間で成形されるために溶接欠陥から母材のわれを誘発することもあり、溶接品質を確保することは大切である。

曲率の小さな探傷面から超音波斜角探傷を行う場合探触子の接触面は探傷面に線接触となるために超音波の伝達損失が生じ、さらに1回反射法よる場合には内面で超音波は拡散しエコー高さを低下させる。このためにJIS Z 3060では曲率の小さな円周継手の探傷は探触子の接触面の曲面加工を行ったうえで対比試験片を用いて感度設定をし探傷を行うが、円形断面をもつ鋼管と異なり角形鋼管の場合には4辺の平面からの探傷と角部の曲率をもった探傷面からの探傷が連続する。従って探触子の接触面の曲面加工は行わずに探傷が可能であれば効率的である。

以上のような背景からWGではあまり繁雑とならない探傷方法によって同一の溶接延長である平板部の溶接と同等に角部の溶接を評価する事を目的に検討を行った。

1 総則

1.1 適用範囲

この指針の適用範囲は探傷面の板厚が9mm以上、19mm以下の角形鋼管柱溶接部の角部の斜角探傷試験に適用する

現在、建築鉄骨の角形鋼管の板厚は6mmから40mm程度までが使用されているが本指針では日本建築学会の検査規準の板厚の下限値である9mm以上とした。また板厚が19mmを超えると曲率半径は50mm以上となりJIS Z 3060の適用が可能となる。なお、探傷は外面から直射法又は1回反射法で行う。板厚が薄い範囲では直射法に限定すると試験のできない範囲が多くなり、1回反射法を用いないと有効な試験は行えない。

2 探傷方法

2.1 探触子

角形鋼管柱の溶接部は平板部から曲率をもつ角部の溶接部へ連続するために平板部と同一の探触子を用いて探傷する方法について検討した。この結果及び対象の板厚から平板部に用いる5M10×10A70の探触子を用い、接触面の曲面加工は行わないこととした。

2.2 接触媒質の塗布

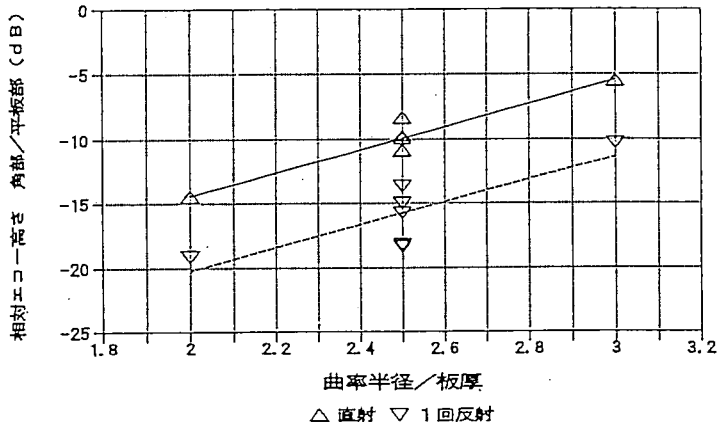
接触媒質は濃度75%以上のグリセリン水溶液、グリセリンペースト又は音響結合がこれと同等のものを用いる。接触媒質の塗布は平面で面の粗い場合には多めに塗布すること

が有効であるが、曲率の小さな曲面の場合には多く塗布し探傷面と探触子の隙間を埋めようとするとエコー高さは不安定に変動し、かつエコー高さは低下する。

実験では接触媒質を薄く塗布（塗布後指でぬぐい取る）した場合にはエコー高さは安定し再現性も良くシャープなエコーが観察されたが接触媒質を多く塗布した場合にはエコー高さは3 dB程度低下した。

2.4 探傷感度

実験により平板部と角部に加工した $\phi 4 \times 4$ mmの平底穴によりエコー高さを比較した結果、解図1のように曲率半径及び直射法か1回反射法かによってエコー高さに差異が生じる。直射法の場合には角部のエコー高さは平板部に比較して、曲率半径が2 t（tは板厚）の場合14 dB、2.5 tの場合10 dB、3 tでは6 dB程度低くなる。また1回反射法の場合にはさらにそれぞれ6 dB程度低くなる。スリットの場合には直射法は同じ傾向を示すが、1回反射法の場合には $\phi 4 \times 4$ とは異なり直射法と1回反射法のエコー高さの差は少ない。

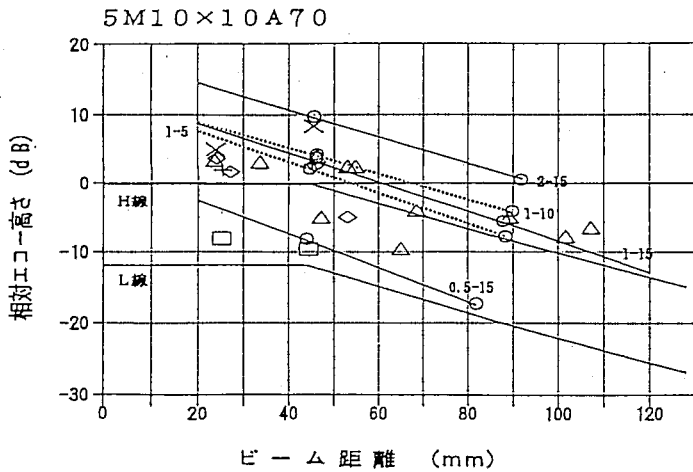


解図 1 角部のエコー高さ（曲率半径と $\phi 4 \times 4$ のエコー高さの関係）

平板部に加工したスリットのエコー高さに対して角部の探傷感度を10 dB高めたときの各スリットのエコー高さを解図2に示す。曲率半径が小さな場合には平板部とのエコー高さの差は大いが、板厚が薄くビーム距離が短いためにSTB-A2 $\phi 4 \times 4$ mmの距離振幅特性曲線の水平部分の範囲になり、距離振幅特性曲線を基準とした平板部と角部のエコー高さを比較すると両者はほぼ同じとなる。

深さ1 mm（長さ5、10、1.5 mm）のスリットは平板部、角部ともに $\phi 4 \times 4$ mm H線+2 dBから4 dB程度のエコー高さとなり、深さ0.5 mm（長さ1.5 mm）のスリットはL線+2 dBから4 dB程度となる。

以上のように角部の探傷感度を10 dB補正することによって平板部と角部はほぼ同じ検出感度とすることができ、この探傷感度によって深さ0.5 mm程度のスリット相当のきずが検出されることになる。



スリットの寸法とシンボル

深さ	長さ	コーナー部	平板部
0.5	15	□	○
1.0	5	+	○
1.0	10	◇	○
1.0	15	△	○
2.0	15	×	○

単位 (mm)

解図 2 スリットのエコー高さ

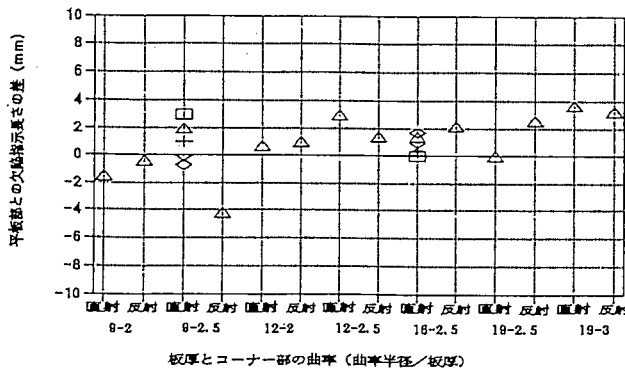
2.6 きずの指示長さの測定

きずの指示長さの測定は図1に示す探触子の位置を保持しながら左右走査を行う。このときコンベックス等の薄目のスケールを曲面に密着させて保持しこれをガイドに左右走査をするとよい。

曲面から探傷を行う場合、超音波の音軸方向は角部の法線方向となり探触子の移動距離をそのままきずの指示長さとする。曲率ときずの深さによって拡大されて測定される。本指針では、曲率が板厚の2~3倍の範囲を扱っており板厚の裏面位置にあるきずの指示長さは1.5倍~2倍に拡大される事になる。

きずの指示長さは、感度補正量を加えた探傷感度によって探傷し、L線を超える範囲の探傷面上での探触子の移動距離から計算により補正する。

実験によって平板部に加工したスリットの指示長さと角部に加工したスリットの補正後の指示長さは、解図3のように同程度に求めることができる。



スリットの寸法

深さ	長さ	シンボル
0.5	15	□
1.0	5	+
1.0	10	◇
1.0	15	△
2.0	15	×

単位 (mm)

解図 3 きずの指示長さ

〈参考文献〉 1) 立川克美 白井越朗 角形鋼管角部の超音波探傷試験の適用一回送実験による探傷実験 千葉県機械金属試験場 平成3年度研究報告 No.21

「裏あて金付完全溶込みT継手のルート部からのエコー判別方法に関する指針」改正WG中間報告

An Interim Report of Revision for "Guide Line for Judgement Method of Echo from Defects and/or Parasitic Echo at Root of Single Bevel Groove Welded T-Joints with Backing Strip in Ultrasonic Examination"

212 小委員会
WGリーダー - 立川克美

概 要

本WGでは、裏あて金付完全溶込みT継手のルート部のきず判別に関する202指針の改正を実施するに当たり、現行指針の問題点を抽出すると共に、現場で判断の容易な且つ合致率の高い新指針をつくる目的で作業を進めている。

実験は継続中であるが、中間結果として以下が得られた。

計算から求めたきずの深さ位置が板厚より深い場合、たれ込みと判断するときずを見落とす恐れが大となる。

SH波を用いると高い確率で判断可能であるが、適用に困難さや制限がある。

裏あて金付きT継手のルート部の欠陥判別WG委員構成表

リーダー；	立川 克美	千葉県機械金属試験場	(NDI)
幹 事；	荒井 均	(株)キューシーコンサルタント	(CIW)
	柏瀬 一彦	東京理学検査(株)	(STIA)
	上平 綱昭	エンジニアリングサービス(株)	(STIA)
	倉持 貢	清水建設(株)技術研究所	(NDI)
	城島 保茂	(株)東京鐵骨橋梁製作所	(NDI)
	名取 孝夫	(株)ジャスト研究所	(NDI)
委 員；	有井伸一郎	(株)シーエックスアール	(CIW)
	有馬 良雄	(株)検査サービス	(CIW)
	井川 敏之	(株)アイ・エム・シー	(CIW)
	岡 賢治	(株)検査技術研究所	(NDI)
	笠原 基弘	日本超音波試験(株)	(CIW)
	加藤 功	(株)検査技術研究所	(NDI)
	小池 光裕	三菱電機(株)	(NDI)
	幸崎 進	ジャパンプローブ(株)	(NDI)
	鈴木 孝信	(株)帝通電子研究所	(NDI)
	鈴木 優治	(株)エスコアイシー	(STIA)
	松村 民久	日本検査コンサルタント(株)	(STIA)
	丸山 和則	北日本X線検査工業(株)	(STIA)
	南 康雄	非破壊検査(株)	(CIW)

1. まえがき

建築鉄骨構造物に多く使用されている裏当て金付レ形開先溶接部ではルート部に溶込み不良と判別の紛らわしいたれ込みが発生する。エコーの表れ方が同一であるにもかかわらず、探傷者の判断の相違から異なる探傷結果が得られ、トラブルの原因となっていた。この問題を解決するために202小委員会のWG-17では種々の実験を重ね「裏あて金付完全溶込みT継手溶接部のルート部からのエコー判別方法に関する指針」¹⁾を1982年に提出した。

この指針の特徴は、12～36mm板厚の裏あて金付溶接部探傷の判断結果に疑義又は差異が生じた場合に、きずの位置から判別に必要な諸情報を集めて、フローチャートにより判別を行う方法である。WG-17によると判別フローチャートによる結果とマクロ試験との確認実験では、その判別に高い合致率を得たとの報告がされている。

しかし、現行指針が示されてから10数年経過した今日、この間の超音波探傷器を始めとする機器の性能向上、溶接方法がアーク溶接から炭酸ガス半自動への変換による初層溶接部の形状変化、TMCP鋼板の普及など当時と諸条件の変化に伴い指針の適用が困難となる状況が生じている。

また、指針のフローチャートから判別するには、豊富な探傷経験とCRT上で得られる超音波情報の高度な判断力とプローブ走査テクニック等を要するため、現場での適用が困難であるとの意見も出されている。しかし、その一方で現指針はかなり良く合致するという意見があるのも事実である。

さらに、近年の建築構造物は高層化され、裏当て金付レ形開先溶接部に適用される板厚が100mm前後まで達しているのと、JIS Z 3060の板厚の下限が6mmであり、指針の適用板厚の拡大が望まれている。

このような状況から現行指針の改正を強く求められ、212小委員会の中に当ワーキンググループ(WG)が発足した。

WGはNDIの212小委員会の委員、日常業務として関係の深いCIW検査事業者協議会、構造物第三者検査機関協会(STIA)の委員等から構成されている。

なお、種々の実験を実施するに当たり、探傷器・探触子メーカー、試験体製作の(株)東京鉄骨橋梁製作所、千葉県機械金属試験場並びに千葉県非破壊検査研究会など関係各位の協力を得ている。

2. 現行202指針の問題点

改正作業を開始するに当たり、探傷現場では現行の指針がどのような評価を受けているか、どのようなところが問題となっているか、また実際に探傷現場で使用されているのか等について情報収集したところ次のような実態が明らかになった。

- (1)指針は複雑すぎて現場での適用が難しくあまり用いていない。
- (2)フローチャートBに問題が多い。下側+3mmは多すぎる。もっと小さくしても良い。もっと使いやすいフローチャートにしてもらいたい。
- (3)現行指針は地域、ファブ、受け入れ側、検査会社等で曲解されている点が多い。
- (4)板厚+3mmの溶込みが必要の考え方がファブに浸透している。また検査会社にも板厚+

3mm溶込みが必要と解釈しているところもある。

- (5)溶込み不良かたれ込みかのトラブルを防ぐため、裏当て金の角を加工またはガウジングにより3mm以上の溶込みが得られるような溶接を行うところもある。
- (6)0.5Sのビーム路程範囲をきずとして取り扱う考えが主流となっている地域もある。
- (7)現行指針の適用は時間がかかりすぎ、現実的には無理がある。探傷者の考えを入れずに判断できるような(ある範囲以上をきず扱いにする)方法がよい。
- (8)簡易法²⁾を適用しているが、この方法でも特に問題はない。
- (9)探触子(振動子材料、ダンピング)によっても違いが出る。MA波形にも影響が出るため、5Zと5Cは同等に扱うことは出来ない。5Cの振動子の方が初層のエコー高さが高く出る。5M10×10A70のみで判断するとの考えに無理がある。

このように、現行指針は現場で使用されるケースはごく少数であることがわかった。特に、板厚の±3mmのA、B区分に反射位置があるものを対象に判別するところを3mm以上の溶込みが必要との誤解はかなり一般に広まっている。

現在のように関西方面で製作された鉄骨が首都圏で建てられ、東北地方で製造されたものが関西方面で建てられるのはごくふつうの時代に、地域による解釈の違いや合意が存在することは、受け入れ検査時のトラブルの基となって判別をより困難にし、ひいては超音波探傷試験の信頼性を損なうこととなる。

3. 改正作業の方針

現行指針の見直しと改正作業を行うにあたり、WGでは次の項目を基本方針とした。

- ①202指針は判別結果に疑義または差異が生じたとき使用するとしたことを、日常的な判別の作業規準として使用するものにする。
- ②日本建築学会規準に取り込められるようにする。
- ③薄板側及び厚板側への適用板厚の拡大を図る。音響異方性材料への適用も考慮する。
- ④5M10×10A70を含め、周波数、屈折角、振動子サイズ等多種の探触子を使用する。クリーピングウェーブやSH波の適用、デジタル探傷器の活用を考える。
- ⑤炭酸ガス半自動溶接による試験体を作成し、集合実験による探傷結果とマクロ試験結果の整合性を確認する。

4. 実験計画

溶込み不良とたれ込みの判別使用するファクターとして次の項目を検討した。

- (1)探触子
- (2)きずのビーム路程、エコー高さ
- (3)デジタル探傷器を用いたMA波形
- (4)きずの静止波形
- (5)クリーピングウェーブ及びSH波による裏面からの溶込み不良の検出
- (6)きずエコーのAC波形及び周波数解析

4.1 使用機器

各メーカーの機差は少ないものとして、探傷器は表1に示す2機種を使用した。ディジ

タル探傷器についても同様とした。探触子も表2に示すようにそれぞれの種類毎に2社（検査技術研究所、ジャパンプローブ）のものを使用した。

4. 2 試験体

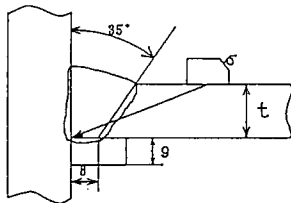
試験体は表3に示すような板厚の裏当て金付きレ型開先T継手試験体とし、L形とI形の溶込み不良及びたれ込みを炭酸ガス半自動溶接にて作成した。

表1 使用探傷器

ポータブル型	UFD-360 (帝通電子研究所)
	FD-670 (三菱電機)
デジタル型	UI-21 (三菱電機)
	AD-3213 (エーアンドデー)

表2 使用探触子

モード	周波数	振動子寸法	公称屈折角
SV波	5	10×10	75°, 70°, 65°, 60°, 45°;
		10×10	70°, 65°, (広帯域)
	2	14×14	70°, 65°, 60°, 45°;
		20×20	70°, 65°, 45°;
SH波	5	10×10	(90°, 70°, 60°, 45°)
		5×5	(90°)
	2	10×10	(70°)
クリーピング ダウエーブ	5	10×10 ダブル	-



裏当て金付きT継手試験体

表3 試験体

板厚 (mm)	きずの種類	試験体数及び探傷箇所
6, 12, 19 22, 25, 32	L形溶込み不良	原則として板厚毎に各きずの試験体を2体ずつ作成。 各試験体ともエコー高さの安定しているところ3箇所を測定位置とした。
	I形溶込み不良	
36, 40, 46 55, 80,	I形溶込み不良	
	たれ込み	

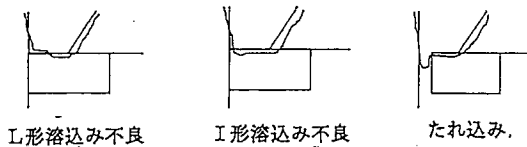


図1 試験体ときずの形状

4. 3 実験の手順

第一次集合実験 板厚19, 22, 40, 46mm

溶込み不良とたれ込みの判別に適用可能な各ファクターの有効性を確認すると共に、探触子のセレクトを行った。

第二次集合実験 板厚12, 25mm

第三次集合実験 板厚36, 55mm

第四次集合実験 板厚6mm, 80mm

この他に補足実験及びマクロ試験を3~4回実施する。

5. 結果

結果の整理が終了している第一次集合実験及び第二次集合実験の一部について報告する。

5. 1 斜角探傷によるきずの深さ測定結果

板厚19mm, 22mm, 及び44mm試験片のL形溶込み不良, I形溶込み不良, たれ込みのSV波探触子による測定結果を図2に示す。

ここではビーム路程で計算された深さ位置を, 使用した8種類(16個)の探触子別に

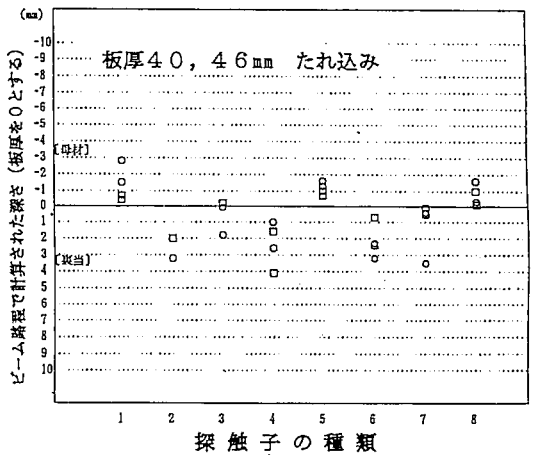
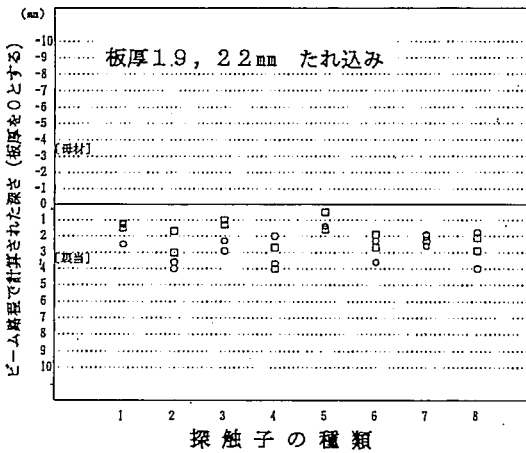
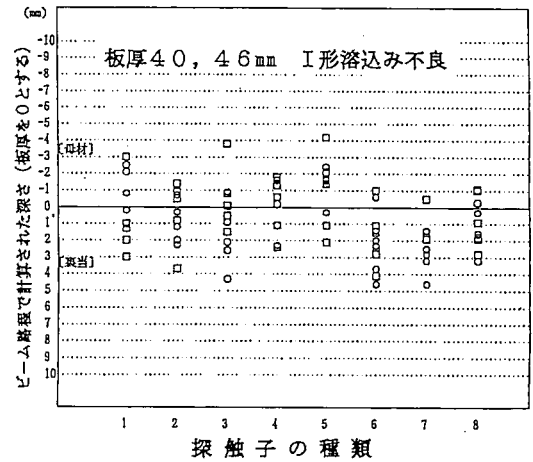
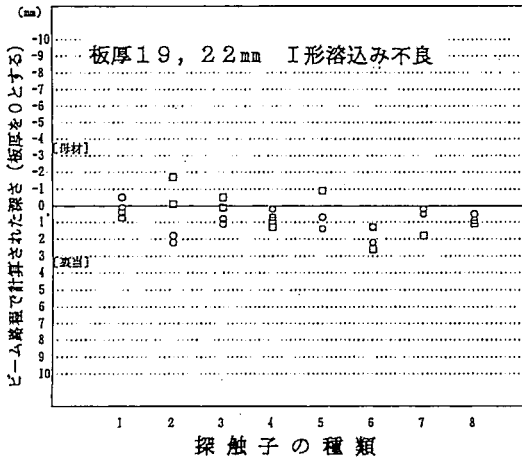
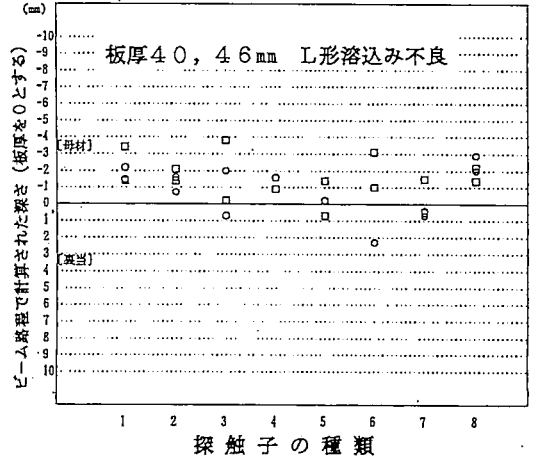
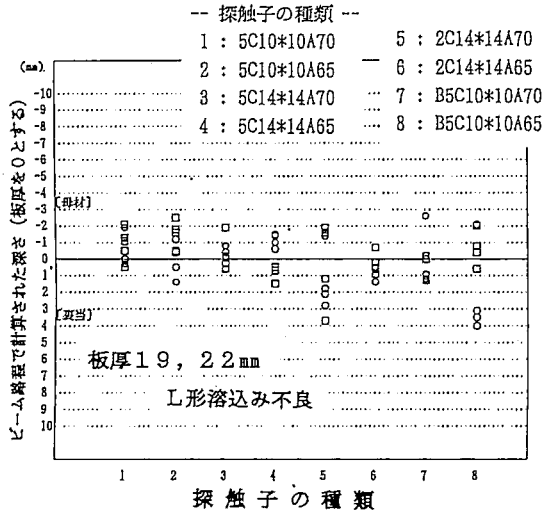


図2 各種探触子によるきずの深さ位置

板厚を基準にプロットした。L形溶込み不良であっても板厚より深く検出されており、I形溶込み不良の方がその傾向は顕著である。

図3はマクロ試験によるきずの位置測定結果と斜角探傷との合致率を表したもので、板厚をしきい値とすると、どの探触子も合致率が低く、板厚よりも深くするに従ってきずと判別する率が高くなる。しかし、これと逆にたれ込みの合致率はしきい値を深くするほど低下する。

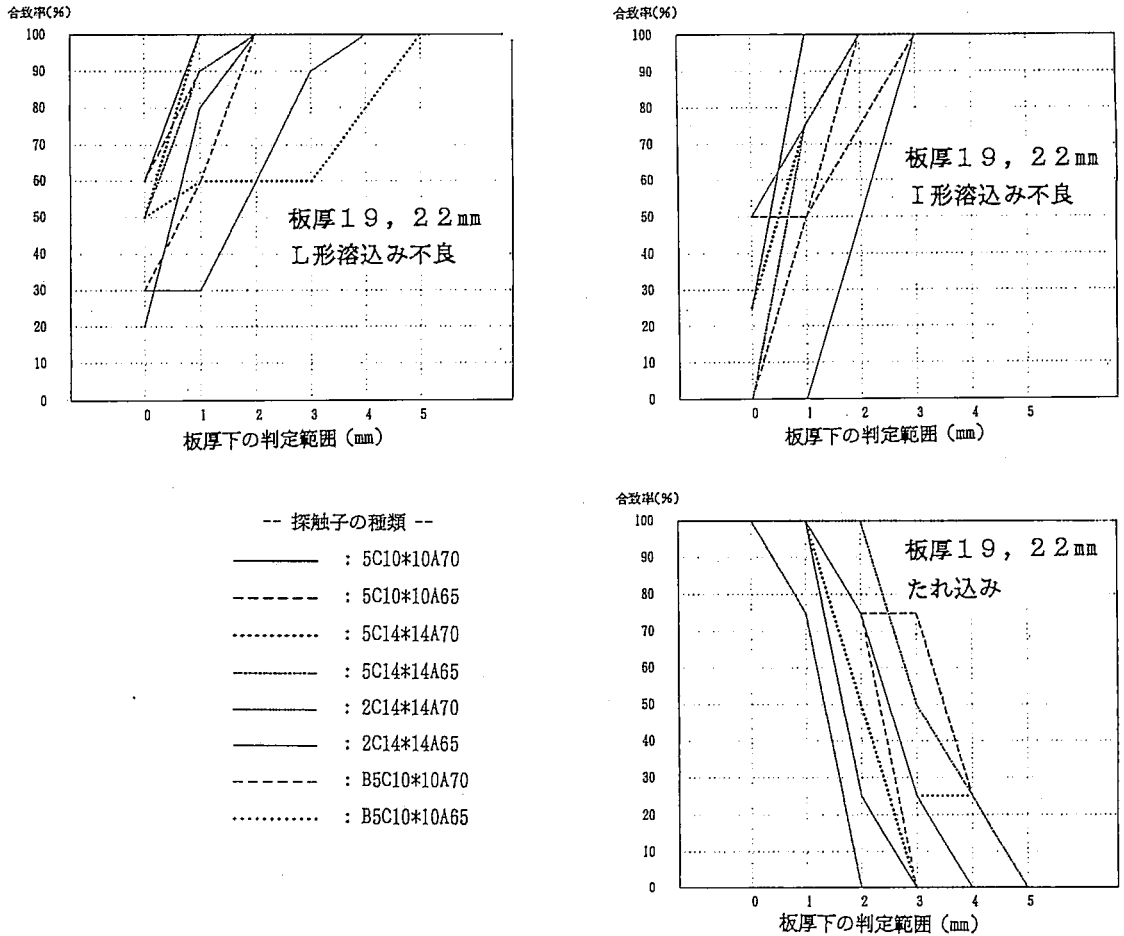


図3 きずと判定する深さ範囲とマクロ試験による合致率との関係

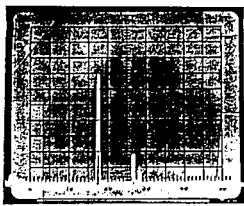
5. 2クリーピングウェーブ及びSH波の適用

クリーピングウェーブ及びSH波による表面及び表面近傍のきず検出に関する文献は数多くある。^{3) 4) 5)} 本WGでは判別の手法として、クリーピングウェーブ及びSH波の適用の可能性についてアプローチした。

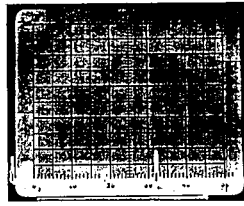
一次集合実験で用いた試験片によるクリーピングウェーブとSH波の比較ではSH波は図4に示すようにシンプルな波形が得られた。

使用したSH波用接触媒質(日合アセチレン製, SHN95)は以前のものに比較すると使用性は向上している。

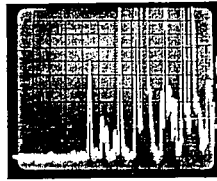
木村のSH波の音場計算⁶⁾によると、5MHz \times 10 \times 10のSH波探触子では、屈折角



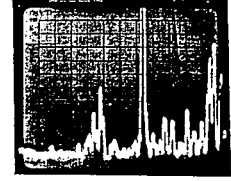
SH波
(きず高さ3.2mm)



SH波
(きず高さ0.4mm)



CW
(きず高さ3.2mm)



CW
(きず高さ0.4mm)

図4 SH波, クリーピングウェーブの波形

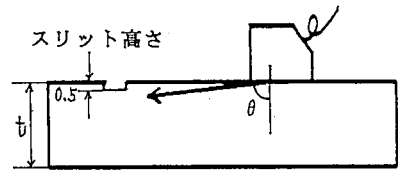
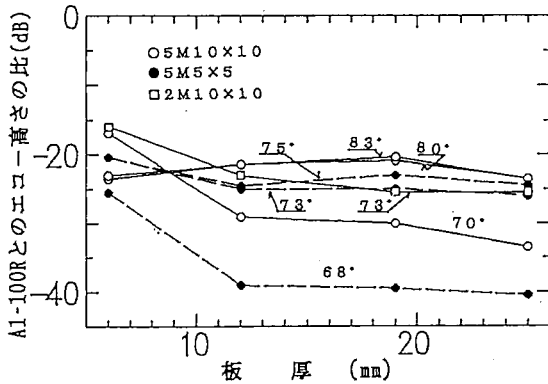


図5 SH波探触子の屈折角とエコー高さ (スリット深さ 0.5mm)

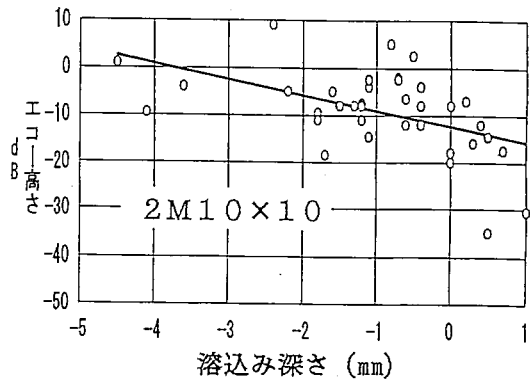
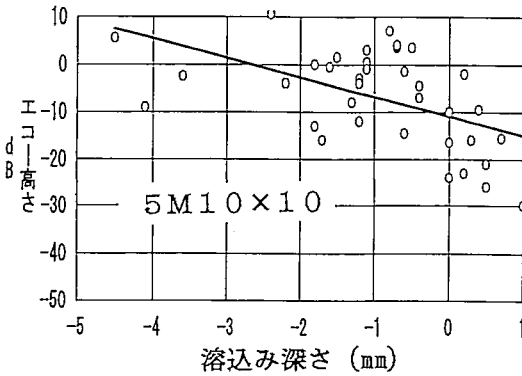


図6 SH波探触子によるエコー高さときずの深さとの関係

75° 以上では表面を伝搬する。

図5は0.5mm高さのスリットきずを板厚を変化させエコー高さを測定した。この結果から、主ビームの屈折角が75°以上の探触子が適している結果が得られた。

現在のところ第二次集合実験の試験体までマクロ試験によるきずの実測が終了している。SH波の探傷感度をSTB-A2φ4×4のY距離40mmを基準感度として、溶込み不良とたれ込みの高さとSH波のエコー高さを図6に示す。

この結果では基準感度の-12dBできずの判別に適用できる可能性のあるデータが得られた。

5. 3 他のファクターのアプローチ

きずエコーの静止波形を利用する方法は、探傷器により波形に種々のフィルターをかけているため判断材料とすることは困難である。また、デジタル探傷器の液晶ディスプレイでも静止波形のぎざぎざを判別することはできない。

MA表示やきずエコーの周波数解析も試みたが、現場的に判断可能な明確な差異は得られなかった。

6. まとめ

本WGの実験は現在も継続中で、これまでの実験で結論を出すには至っていない。

しかし、これまで得られた実験データの中からまとめてみると、

1. 種々の板厚の探傷結果では、ビーム路程と屈折角から計算で求めたきずの深さ位置をもとに板厚を基準として溶込み不良とたれ込みとに判別すると、溶込み不良を見落とす恐れが大きくなる。
2. SH波を用いるとかなり高い確率で判別可能であるが、SH波の伝達には問題点も多い。また、コラム柱やボックス柱のように裏当て金側に探触子が入らないところへは適用できない。
3. 建築鉄骨溶接部の現場探傷の現状で得られるデータは、ビーム路程とエコー高さが主体となるが、現場での使用性を考慮したうえで合致率の高い判別規準となるよう改正作業を進めていく。

参考文献

- 1) 202小委員会：裏あて金付完全溶込みT継手のルート部からのエコー判別方法に関する指針、非破壊検査31巻第7号P475～482
- 2) 日本非破壊検査協会：鉄骨溶接部の超音波探傷試験実施マニュアル(1983)P96, 図4.10.9
- 3) 高橋雅和, 星野充宏：表面及びその近傍を伝搬する波に関する実験的検討(II), NDI資料21431
- 4) 高橋雅和, 星野充宏：表面SH波探触子の一実験について, 超音波による非破壊評価シンポジウム, P9～16
- 5) 横野泰和：表面SH波の特性と表面傷の検出に関する検討, 平成5年度春季大会講演概要集, P101～102
- 6) 木村勝美：SH波探触子の音場プログラム, NDI212小委員会資料No.212-95(1994)

球状黒鉛鑄鉄品の球状化率と超音波の音速に関する実験的検討

日本鑄鉄管機エンジニアリング部 高橋 雅和

概 要

球状黒鉛鑄鉄品の超音波の音速について検討した。鑄鉄の超音波の音速は鋼より遅いことは実験的にはよく知られている。球状黒鉛が鋼中に均一に分布しているものとし、超音波が球状黒鉛を回折するため、全体としてパスが長くなると考えて鋼を基準にして音速を求めた。その結果、鑄鉄が鋼より音速が遅いことを十分説明することができた。また、黒鉛球状化率と超音波の音速との関係を実験的に求め検討した。球状化率と超音波音速との間には強い相関関係があり超音波の音速を計測することで、球状化率の推定が可能である。

1. はしがき

球状黒鉛鑄鉄とは、鑄鉄の溶湯に適当な処理を行い鑄放しても球状黒鉛を晶出し得る鑄鉄をいい、基本的にはねずみ鑄鉄となるべき溶湯にMg、Ca、Ceなど、またはこれらを含む合金を添加し、フェロシリコン、カルシウムシリコンなどで接種を行い、鑄放して球状黒鉛を晶出している鑄鉄である¹⁾。その諸性質は鉄の基地中に黒鉛結晶の分布に密接な関係がある。

鑄鉄の音速は鋼より遅いことは実験や経験で良く知られているが、理論的な検討をした文献²⁾は非常に少ない。球状黒鉛鑄鉄では、超音波の音速は球状化率に大きく左右され、球状化率と超音波の音速の関係を実験的に求めれば³⁾、同一製造方法については超音波の音速を計測することで、球状化率の推定が可能である。

本研究では、黒鉛球状化率と超音波の音速との関係を実験的に求め検討した。また、球状黒鉛と超音波の音速との関係を、超音波が球状黒鉛を回折するため、全体としてパスが長くなると考えて鋼を基準にして音速を求めた。以下実験結果とその考察を述べる。

2. 球状黒鉛鑄鉄品の性能⁴⁾

球状黒鉛鑄鉄品の性能としてJIS G 5502-1989によれば、化学成分、機械的性質（引張強さ、耐力、伸び及びシャルピー吸収エネルギー、硬さ）、黒鉛球状化率、内部の健全性、形状・寸法、質量、外観等が規定されている。この内特に非破壊検査に関連のある黒鉛球状化率は非常に重要で、特に指定がないかぎり、70%以上としている。

3. 黒鉛球状化率の測定

JIS G 5502-1986では黒鉛球状化率の測定は顕微鏡組織写真を撮影して測定すると規定されていたが、JIS G 5502-1989では、『直接観察、画像解析装置の利用、標準組織写真との比較などの方法によることができる』としている。いづれの方法でも試験片を切断し、試料の組織観察をしなければならず、いわゆる破壊検査である。また、『ダクタイル鑄鉄管JIS G 5526-1989では⁵⁾、黒鉛球状化率判定試験は、顕微鏡などを用いて黒鉛球状化の程度を調べる。』とあり今後、技術確立によつて、超音波速度法など導入できるよう、『顕微鏡など』としたと解説に明記されている。これに対して試料の超音波の音速を測定し、その音速値から球状化率が推定できる報告がある⁶⁾。

黒鉛球状化率の判定試験はJIS G 5502-1989 の10.7項に規定されている。また、JIS G 5526-1989 では、黒鉛球状化率の判定方法は解説図による。その内容を次に示す。

10.7 黒鉛球状化率判定試験

JIS G 5502 (球状黒鉛铸铁品)

10.7.1 試験片 試験片は、図1又は図2の供試材の斜線を施した部分から1個採る。

10.7.2 試験方法 試験方法は、顕微鏡組織写真又は直接観察による黒鉛組織について行う。

10.7.3 黒鉛粒の形態分類 黒鉛粒の形態分類は図3のとおりとし、これに基づいて黒鉛粒を分類し、表4の形状係数を与える。

表3 Y形供試材の寸法

種類	図1の寸法	単位 mm				
		a	b	c	d	e
A号		12	40	25	135	150以上
B号		25	55	40	140	150以上
C号		50	90	50	160	150以上
D号		75	125	65	175	150以上

図1 Y形供試材の形状・寸法

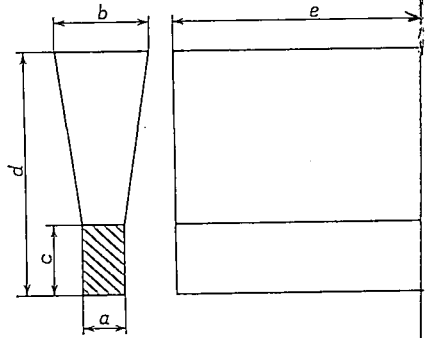


図2 ノックオフ形 (Ka形, Kb形) 供試材の鑄型の形状及び寸法

単位 mm

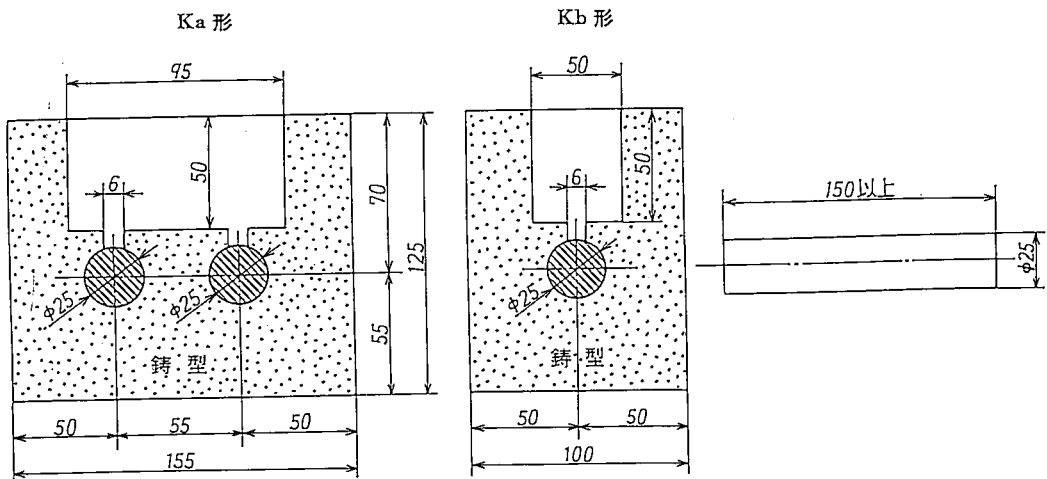
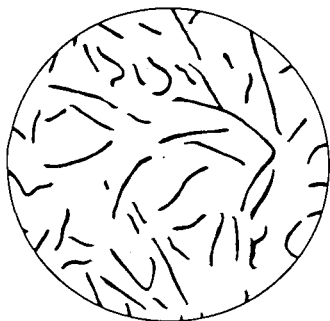
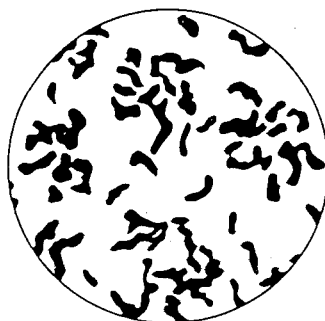


図3 黒鉛粒の形態分類

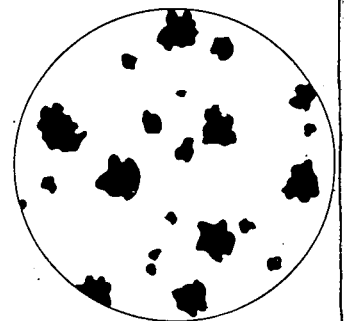
形態1



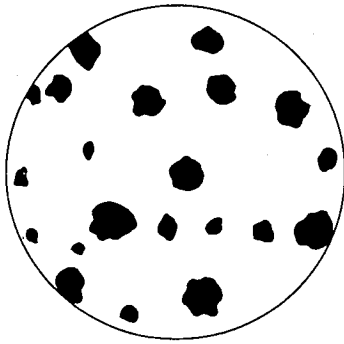
形態2



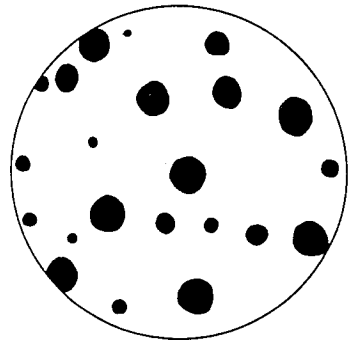
形態3



形態 4



形態 5

表 4 黒鉛粒の形状係数及び黒鉛の最大長さを直径とする円⁽²⁾に対する黒鉛の面積率

形態番号	1	2	3	4	5
形状係数	0	0.3	0.7	0.9	1.0
(参考) 黒鉛の最大長さを直径とする円に対する 黒鉛の面積率 (%)	20 未満	20 以上 40 未満	40 以上 70 未満	70 以上 80 未満	80 以上

注⁽²⁾ 形態 1 及び 形態 2 の黒鉛粒の場合は、片状黒鉛の最大長さの先端を結ぶ直線の長さを直径とする円。

10.7.4 顕微鏡組織写真による黒鉛球状化率の算出 顕微鏡組織写真を用いて黒鉛球状化率を算出する場合の方法は、次による。

- (1) 組織観察は、その倍率を原則として 100 倍とし、5 視野について行う。
- (2) 写真面の両対角線を中心として幅 3 mm の間隔で直線を引き、その間に挟まれる両対角線帯（以下、両対角線帯という。）の上に載る黒鉛粒を対象とする。ただし、2 mm（実際の寸法 20 μm）以下の黒鉛粒は対象としない。
- (3) 両対角線帯の上に載る黒鉛粒の数が 10 個未満の場合には、10 個以上となるように両対角線帯の幅を広げるか、適当な倍率を選択する。
- (4) 黒鉛粒数と形状係数から、次の式によって黒鉛球状化率を算出する。

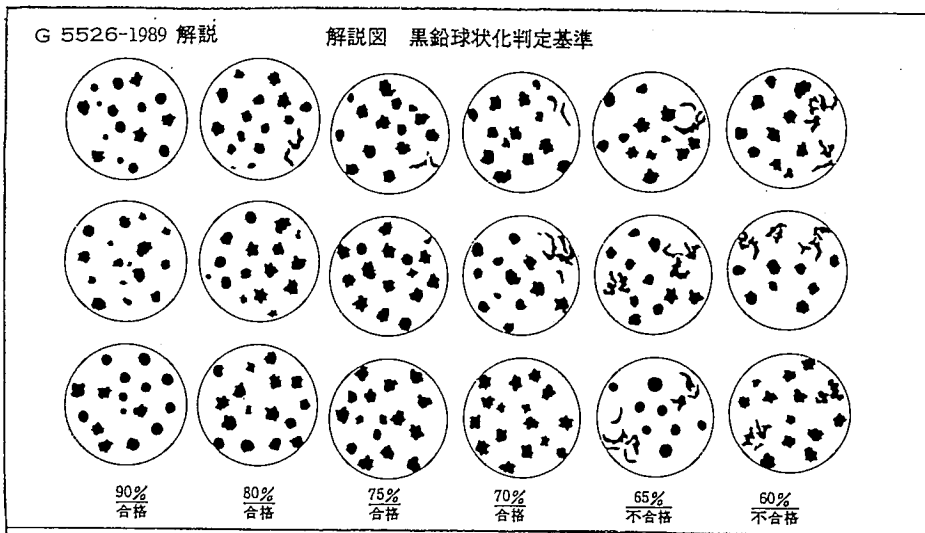
$$\text{黒鉛球状化率 (\%)} = \frac{0 \times n_1 + 0.3 \times n_2 + 0.7 \times n_3 + 0.9 \times n_4 + 1.0 \times n_5}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5} \times 100$$

ここに、 $n_1 \sim n_5$ ：図 3 の形態番号に該当する黒鉛粒の数

- (5) 試料被検部の 5 視野について得られた結果から平均球状化率を算出し、これを、その試験片の球状化率とする。

10.7.5 その他の方法による黒鉛球状化率の算出 10.7.4 の方法のほかに、次のいずれかの方法を用いてもよい。

- (1) 顕微鏡によって直接観察する場合は、直交する線帯を刻んだガラス板を顕微鏡の接眼鏡に挿入するなどの方法を用いて、10.7.4 に準じて行う。
- (2) 画像解析装置によって算出する場合は、10.7.4 に準じて行う。
なお、この場合は、画面上のすべての黒鉛粒（実際の寸法 20 μm 以下を除く。）を対象にして判定してもよい。
- (3) 受渡当事者間の協定による標準組織写真がある場合には、これを用い、5 視野の組織を比較して球状化率を判定してもよい。ただし、この場合の標準写真の黒鉛球状化率は、10.7.3 によって、10.7.4 又は 10.7.5 の方法で算出する。



4. 実験内容

1)超音波測定器の構成と球状化率測定の原理：日下レアメタル研究所製NDテスター3を使用した。その構成は図4による。

2)探触子：5Z10N

3)試験片：図1のY形供試材の代わりとし図5の厚さ15mm×幅30mm×長さ50mmのShellにより試料を採取する。球状化率の異なる50個のサンプルを鋳造しこの内37個を選定し、球状化率測定用サンプルとした。

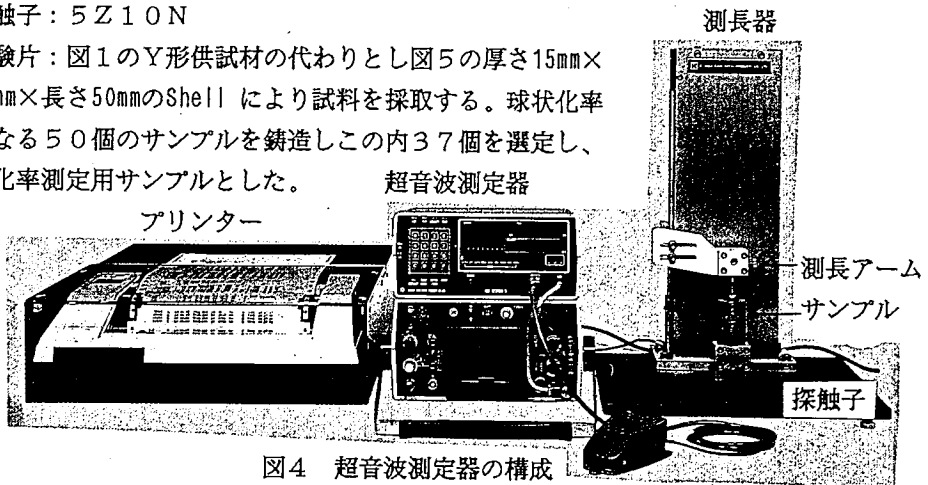
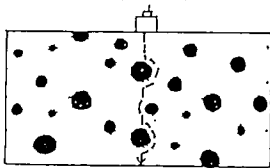


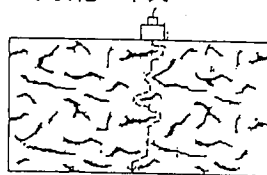
図4 超音波測定器の構成

4)原理 球状化 良



音速早い

球状化 不良



音速遅い

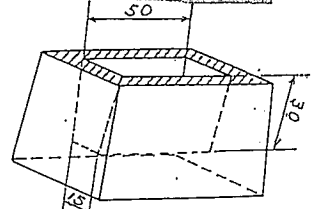


図5 試料採取用Shell

5)超音波の音速測定：長さ50mmの部分の超音波の音速を求めた。縦波音速 V_L は(1)式による。

$$V_L = L/t \quad \dots \dots \dots (1)$$

V_L ：縦波音速、L：試料の長さ

T：送信パルス、B：長さ50mmの底面エコー

t：時間

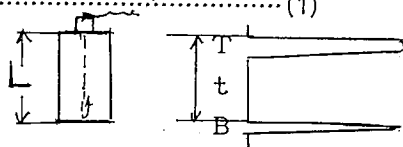


図6 超音波の音速を測定

6)接触媒質：マシン油

7)球状化率の測定と検量線：サンプル37個の超音波の音速を測定後、各サンプルのマイクロ写真(×100)を撮影し、NIK法により球状化率を求めた。また、37個のNIK法による球状化率と縦波音速 V_L との関係より検量線を求めこれをNDテスター3に入力した。

5. 実験結果と考察

表1は超音波音速とNIK法により球状化率測定データを、図7は球状化率測定用サンプルのマイクロ写真の一例を示す。図8は球状化率と超音波音速の関係を示す。超音波音速 X (m/s)、球状化率 Y (%)とすると表1と図8より次の関係が得られる。

- 1)超音波音速 X と球状化率 Y の間には強い相関関係があり、相関係数 $R=0.977$ である。
- 2)また、超音波音速 X と球状化率 Y との間の回帰式は(2)式で一般的に表される。

$$Y = A \cdot X + B \dots\dots\dots (2)$$

表1の解析結果、 $A=0.2592$ 、 $B=-1383$ で X と Y との間に(3)式の関係がある。

$$Y = 0.2592X - 1383 \dots\dots\dots (3)$$

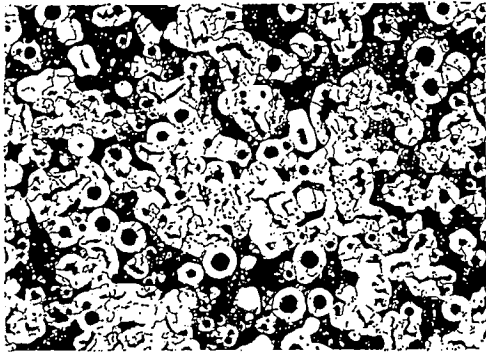
- 3)以上の解析結果、図5のShellを使用し試験片を採取し、超音波音速を測定すれば球状化率を求めることができる。この関係をNDテスター3の検量線とした。
- 4)検量線作成後の球状化率測定結果の確認

DTテスターに検量線を入力後、サンプル37個の球状化率を測定($N=4$ 回)し、先に求めたNIK法による球状化率との比較を行った。その結果、両者の相関係数 $R=0.988$ であり入力した検量線で球状化率の測定が可能である。

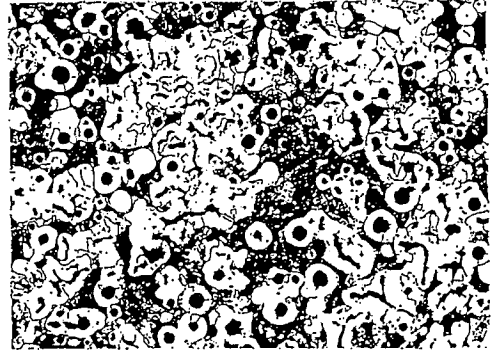
表1 超音波音速とNIK球状化率測定データ

No	サンプルNo	UT(釐)	マイクロ(球状化率)	No	サンプルNo	UT(釐)	マイクロ(球状化率)
		km/s	%			km/s	%
1	1-1	5548	58	20	12-1	5527	45
2	1-2	5546	59	21	12-2	5520	50
3	2-1	5548	56	22	13-1	5514	45
4	2-2	5547	53	23	13-2	5516	49
5	3-1	5547	55	24	14-1	5514	50
6	3-2	5552	50	25	14-2	5503	48
7	4-1	5546	52	26	15-1	5500	47
8	4-2	5552	53	27	2-A	5672	85
9	5-1	5556	57	28	91-1	5644	82
10	5-2	5561	57	29	91-2	5614	69
11	51-1	5692	89	30	92-1	5625	74
12	51-2	5680	93	31	92-2	5631	74
13	52-1	5676	93	32	93-1	5639	76
14	52-2	5679	92	33	93-2	5644	72
15	5A-1	5683	95	34	94-1	5633	75
16	5A-2	5677	95	35	94-2	5621	69
17	5B-1	5690	94	36	95-1	5615	73
18	5B-2	5689	92	37	95-2	5602	76
19	11-2	5545	56	Average Value		$\bar{X}=5595.9$	$\bar{Y}=67.8$

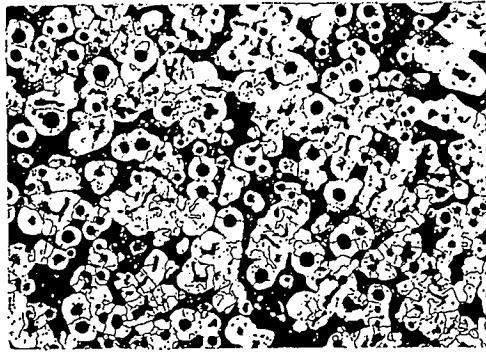
NO12-1 5527m/s 45%



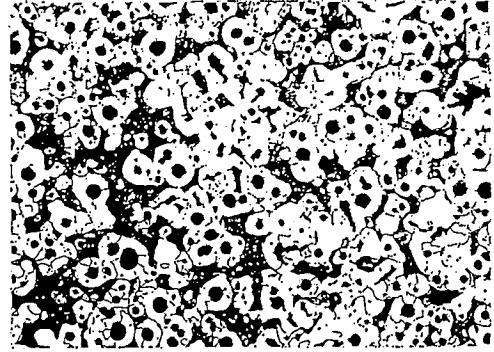
NO12-2 5522m/s 50%



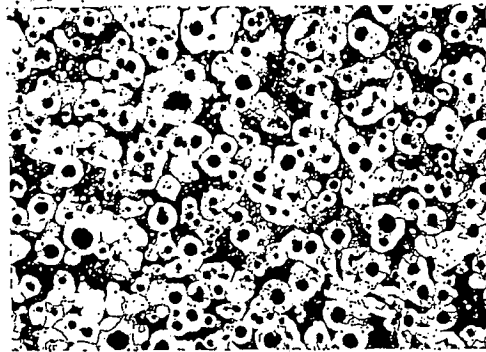
NO5-1 5556m/s 57%



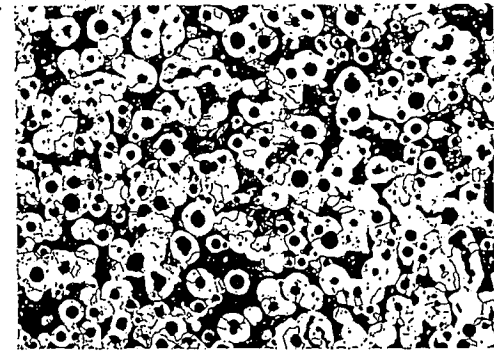
NO94-2 5621m/s 69%



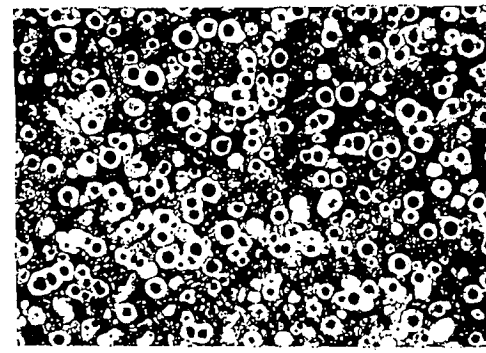
NO93-1 5639m/s 76%



NO91-1 5644m/s 82%



NO51-2 5680m/s 93%



NO5A-1 5677m/s 95%

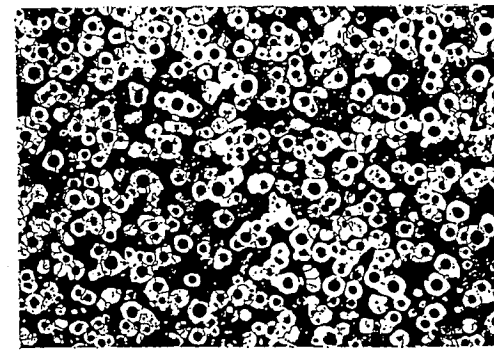


図7は球状化率測定用サンプルのマイクロ写真の一例

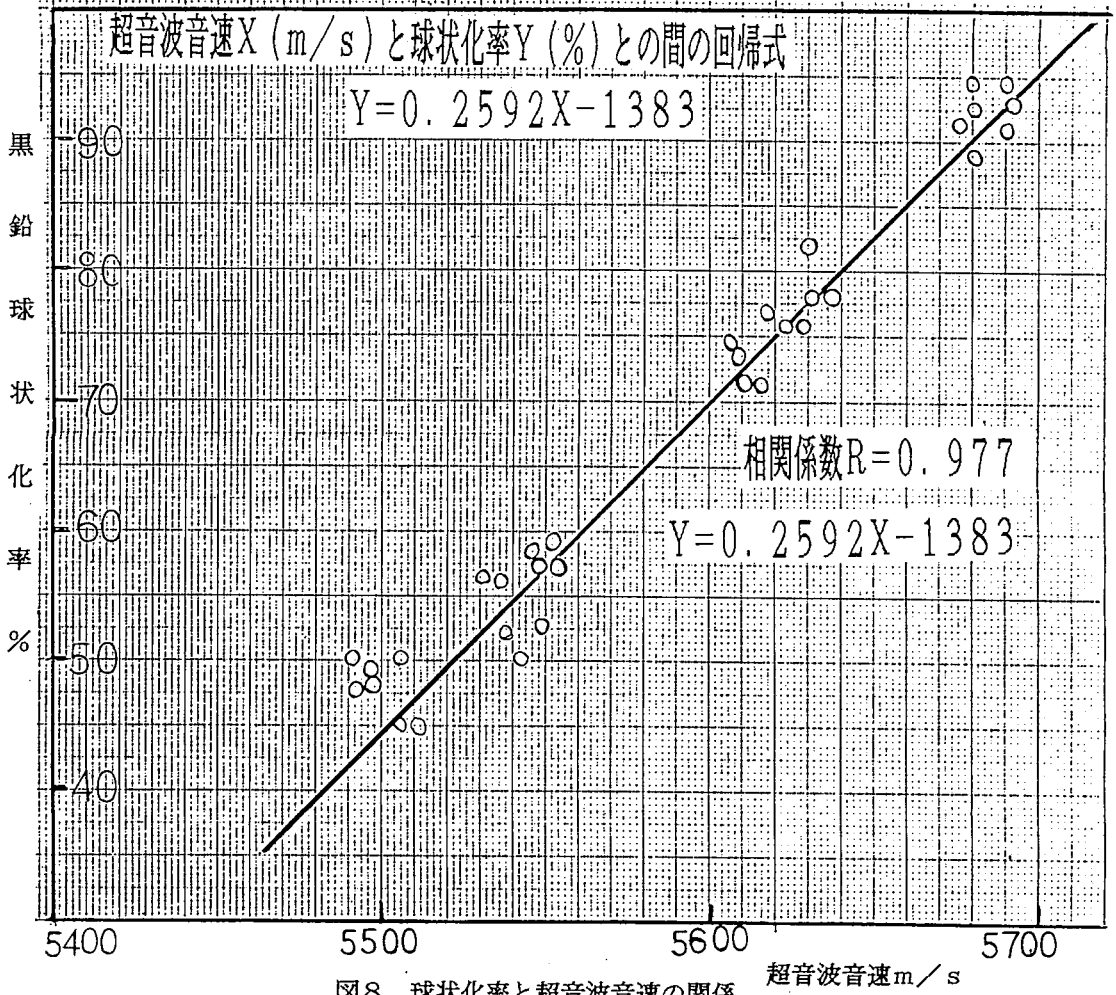
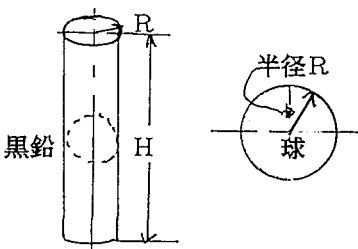


図8 球状化率と超音波音速の関係

6. 球状黒鉛の分布

1) 単位円柱と黒鉛半径Rとの関係



球状黒鉛が鑄鉄中に均一に分布しているものとし、高さH、半径Rの円柱に半径Rの球状黒鉛が存在すると考える。

R : 円柱の半径、H : 円柱の高さ、 ρ_g : 黒鉛の密度 (比重)、 ρ_s : 鋼の密度 (比重)、C : 鑄鉄のC% (黒鉛の%) とすれば次の関係がある。

図9 単位円柱と黒鉛との関係

$$C_x = \frac{4/3 \pi R^3 \rho_g}{(\pi R^2 H - 4/3 \pi R^3) \rho_s + 4/3 \pi R^3 \rho_g} \times 100 \dots (4)$$

$$= 4.189R \cdot \rho_g / ((\pi H - 4.189R) \rho_s + 4.189R \cdot \rho_g) \times 100$$

球状黒鉛鑄鉄の基礎と応用によれば¹⁾ $\rho_g = 2.25$ 、 $\rho_s = 7.86$ であり (4) 式に代入して

$$C_x = 942.5R / (24.69H - 32.92R + 9.425R) \dots (5)$$

(5) 式よりHを求めれば(6) 式となる。

$$H = R(942.5 / (24.69C) + 23.495C / (24.69C)) = R(38.17/C + 0.95) \dots (6)$$

C = 3.5 %の時の単位円柱の高さHは、H = 11.86R、C = 4.0 %の時は、H = 10.49Rである。

2) 球状黒鉛鑄鉄の音速

鋼と鑄鉄の音速の相違を考える場合半径R、高さHの単位円柱を考えれば良い。その時黒鉛の部分は音波が回折しパスレングスが長くなると考える。直進する超音波の平均距離は $2R/3$ 、回折する超音波の平均距離は $\pi R/4$ で²⁾、この差が距離Rを通過する時に生ずる。即ち単位円柱(鋼)の超音波パスをLとすれば、鑄鉄では、 $H-2R$ は鋼と同じパスで通過するが、 $2R$ の距離では $0.1187R \times 2 = 0.237R$ 分だけパスが長くなる。これが音速低下につながる。音速低下($V_L - \Delta V_L$)は $C=3.5\%$ の時、 $11.86/(11.86+0.237)=0.98$ 、 $C=4.0\%$ の時 $10.49/(10.49+0.237)=0.978$ である。

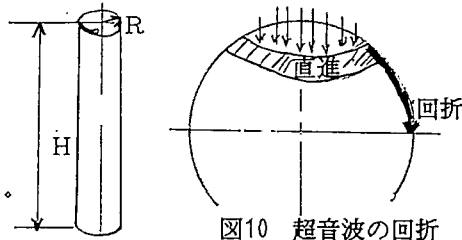


図10 超音波の回折

従って鑄鉄の音速はどんなに早いとしても、超音波の回折理論から考えれば、縦波音速 $V_L - \Delta V_L = 5900 \times 0.98 = 5782 \text{ m/s}$ となる。製造方法や組織及び組成の相違を考えれば、文献^{6)~10)}の球状黒鉛鑄鉄の最高音速は $5690 \sim 5885 \text{ m/s}$ で、ほぼこの値を説明している。

7. 糸言

球状黒鉛鑄鉄品の超音波の音速について検討した。また、黒鉛球状化率と超音波の音速との関係を実験的に求めた。その結果、次の結論が得られた。

- 1) 球状黒鉛が鋼中に均一に分布しているものとし、超音波が球状黒鉛を回折するため、全体としてパスが長くなると考えて鋼を基準にして音速を求めた。その結果、鑄鉄が鋼より音速が遅いことを十分説明することができた。
- 2) また、超音波音速と球状化率との間には強い相関関係があり、同一製造方法や組織及び組成の溶湯であれば、超音波の音速を計測することで、球状化率の推定が可能である。
- 3) 超音波音速 X (m/s) と球状化率 Y (%) との間に $Y = 0.2592X - 1383$ の関係がある。

参考文献

- 1) 井川克也他：球状黒鉛鑄鉄の基礎と応用、球状黒鉛鑄鉄…定義と名称、pp1-2 (1992)、丸善株式会社
- 2) Qin Ben-De: The Basic Principles on Ultrasonic Velocity Method to Evaluate the Nodularity of the Graphite in Ductile Iron, 11th World Conference of Nondestructive Testing, Vol 3, p1572-1577, (1985)
- 3) 日本鑄物協会：鑄鉄溶湯の性状及び材質(超音波音速)判定に関する研究(鑄鉄溶解技術と溶湯特性に関する研究会報告)、研究報告47、October, p1~121, (1987)
- 4) J I S G 5502-1989 球状黒鉛鑄鉄品
- 5) J I S G 5526-1989 ダクタイル鑄鉄管
- 6) 細見嘉男、小野昭三、植野友博：超音波法によるダクタイル鑄鉄管の黒鉛球状化率自動検査方式、栗本技報、No.20(January), p1~17, (1989)
- 7) 阿部、川原、井川：超音波映像法による鑄鉄の内部欠陥検査、鑄物、62, (1990), 8, p635
- 8) 大出、井川：鑄鉄の組織と音速との関係、鑄物、60, (1988), 2, pp116-121
- 9) 阿部、玉、井川：鑄鉄の音速に及ぼす熱処理の影響、鑄物、57, (1985), 11, pp704-709
- 10) 非破壊評価技術の標準化に関する調査研究、平成3年度調査報告書、1992年3月、日本非破壊検査協会